



ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ ENVIRONMENTAL ENGINEERING

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-298-311

EDN: RDGODG

УДК 504.5.06:630*181.351:676.084

Научная статья / Research article

Оценка возможности использования гидролизного лигнина для биологической рекультивации

В.М. Юрк  , А.А. Шашкова, В.А. Снегирев , Н.А. Третьякова 

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация
 v.yurk@yandex.ru

Аннотация. Гидролизный лигнин является крупнотоннажным промышленным отходом, который не находит полезного применения и размещается на специальных полигонах, выступая причиной отчуждения полезных земель и оказывая негативное воздействие на окружающую среду. Цель исследования – оценка возможности использования гидролизного лигнина, образовавшегося в результате деятельности Ивдельского лесозавода, для биологической рекультивации нарушенных земель. Объект исследования – гидролизный лигнин из лигнинохранилища, расположенного в г. Ивдель Свердловской области. Изучение состава отхода, накопленного в лигнинохранилище, показало, что содержание лигнина в нем составляет 58,97 % масс., также значительную часть составляет минеральная фракция, представленная в основном оксидами кремния, алюминия и кальция. Суммарное содержание тяжелых металлов не превышает 0,15 % масс. Проведенные эксперименты показали, что токсический эффект водной вытяжки на тест-культуру (красный клевер *Trifolium pratense* L.) отсутствует, соответственно, отход имеет V класс опасности. Используемые для биологической рекультивации субстраты не должны оказывать токсический эффект на выращиваемые культуры. В связи с этим была проведена оценка фитотоксичности по выращиванию тест-культур – овса *Avena sativa* L. и клевера лугового красного *Trifolium pratense* L. – на субстрате из отхода. Результаты эксперимента показали меньший по сравнению с контролем процент всхожести и прирост биомассы растений, но при этом тест-культуры развивались нормально, на

© Юрк В.М., Шашкова А.А., Снегирев В.А., Третьякова Н.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

листьях и побегах отсутствовали какие-либо повреждения. Таким образом, исследования показали возможность использования рассматриваемого гидролизного лигнина в качестве субстрата для биологической рекультивации без предварительной обработки.

Ключевые слова: фитотоксичность, рекультивация, рекультивационный материал, переработка отходов

Вклад авторов. Юрк В.М. – научное руководство исследованием, проведение исследовательского процесса; Шашкова А.А. – проведение исследовательского процесса, отслеживание воспроизводимости результатов экспериментов; Снегирев В.А. – предоставление лабораторных образцов азотфиксирующих бактерий для проведения исследования; Третьякова Н.А. – курирование данных, подготовка черновика рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 06.02.2025; доработана после рецензирования 10.04.2025; принята к публикации 20.04.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Юрк В.М., Шашкова А.А., Снегирев В.А., Третьякова Н.А. Оценка возможности использования гидролизного лигнина для биологической рекультивации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 3. С. 298–311. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-298-311>

Assessment of the possibility of using hydrolysis lignin for biological reclamation

Victoria M. Yurk^{ID}✉, Aleksandra A. Shashkova,
Vyacheslav A. Snegirev^{ID}, Natalia A. Tretyakova^{ID}

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

✉v.yurk@yandex.ru

Abstract. Hydrolysis lignin is a large-scale industrial waste that has no useful application. It is disposed in special landfills, causing alienation of valuable lands and having a negative impact on the environment. The aim of the work was to evaluate the possibility of using hydrolysis lignin formed as a result of the activities of the Ivdelsky timber processing plant for biological reclamation of disturbed lands. The object of the study is hydrolysis lignin from a lignin storage facility located in the city of Ivdel, the Sverdlovsk region. The study of the composition of the runoff accumulated in the lignin deposit showed that the content of lignin in it is 58.97 wt. %, also a significant part is the mineral fraction, represented mainly by oxides of silicon, aluminum and calcium. The total content of heavy metals does not exceed 0.15 wt. %. The experiments have shown that the toxic effect of the aqueous extract on the test culture (red clover *Trifolium pratense* L.) is absent, respectively, the waste is not dangerous to the environment. The substrates used for biological reclamation should not have a toxic effect on the crops grown. In this regard, a phytotoxicity assessment was carried out by growing test object (oats *Avena sativa* L. and red clover *Trifolium pratense* L.) on a substrate from the waste. The results of the experiment showed a lower percentage of germination and growth of plant biomass compared to the control, but the test objects developed normally, there were no

damages on the leaves and shoots. Thus, the studies have shown the possibility of using the hydrolysis lignin as a substrate for biological reclamation without preliminary treatment.

Keywords: phytotoxicity, reclamation, reclamation material, recycling

Authors' contribution. *V.M. Yurk* – scientific supervision of the study, conducting a research and investigation process; *A.A. Shashkova* – conducting a research and investigation process, monitoring the reproducibility of experimental results; *V.A. Snegirev* – providing laboratory samples of nitrogen-fixing bacteria for the study; *N.A. Tretyakova* – data curation, preparation of the draft manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 06.02.2025; revised 10.04.2025; accepted 20.04.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Yurk VM, Shashkova AA, Snegirev VA, Tretyakova NA. Assessment of the possibility of using hydrolysis lignin for biological reclamation. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(3):298–311. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-3-298-311>

Введение

Во многих производствах, осуществляющих первичную переработку различных видов сырья, образуются крупнотоннажные отходы. Такие отходы представляют собой инертные, непрореагировавшие, сопутствующие или вспомогательные материалы, не находящие полезного применения. В настоящее время основная масса этих отходов размещается на полигонах или отвалах вблизи предприятий, на которых они образовались. Негативное воздействие этих объектов проявляется в отчуждении земель, потенциально полезных для народного хозяйства, а также в токсичности примесных соединений в составе отхода, способных мигрировать в окружающую среду и отравлять ее. Поэтому решение проблемы утилизации крупнотоннажных отходов является одной из актуальных экологических задач. К числу крупнотоннажных отходов относится гидролизный лигнин.

Гидролизный лигнин – это отход, который образуется в гидролизном производстве в результате делигнификации древесины. Он является негидролизуемым остатком обработки древесины, разбавленным раствором серной кислоты, и представляет собой сложную смесь лигнина, трудногидрализуемых полисахаридов, смолы, различных золь, моносахаридов, остатков серной и органических кислот, чаще уксусной и муравьиной, а также влаги [1]. Он не растворим в органических растворителях, щелочах и кислотах [2].

В настоящее время гидролизный лигнин практически не используется и размещается на лигнинохранилищах и в отвалах [3]. Несмотря на то, что материал трудно растворяется в различных условиях, объекты его размещения могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Так, некоторые примеси, содержащиеся в составе отхода, могут мигрировать с территории полигона вместе с поверхностным стоком. К таким соединениям относятся серная кислота и ее соли, водорастворимые органические кислоты, фенольные соединения. Также, как отмечают авторы работы [4], поверхность

гидролизного лигнина содержит большое количество радикалов, которые при взаимодействии с кислородом воздуха проявляют высокую способность к самовоспламенению, поэтому нередко на лигнинохранилищах образуются очаговые воспламенения.

Поскольку в гидролизном лигнине достаточно много органической фракции, то его иногда используют в качестве топлива на гидролизных производствах [2; 5]. Однако сжигание не всегда является рациональным способом обращения с отходами, поскольку способствует выбросу большого количества загрязняющих веществ и потере потенциально полезного сырья.

В настоящее время ведется поиск альтернативных способов переработки гидролизного лигнина. Например, из данного отхода возможно получать лигнино-альдегидные смолы [6], лигнинопластик [7], сорбенты [8; 9] и другие ценные продукты. Но технический лигнин характеризуется неоднородностью состава и изменчивостью химических свойств, поэтому его использование в производственных процессах затруднено [10]. Оно требует постоянного контроля и корректировки технологического процесса, что может привести к снижению качества продукции, увеличению производственных затрат и ухудшению экологической ситуации.

Одним из перспективных и простых способов полезного использования многотоннажных нетоксичных отходов является их применение для рекультивации нарушенных земель.

Помимо большого количества органической части гидролизный лигнин может содержать достаточное количество питательных элементов, что делает его привлекательным сырьем для получения удобрений [11], а также потенциальным субстратом для биологической рекультивации нарушенных земель.

Известны способы, когда крупнотоннажный органический отход использовался как сырье для получения удобрений и почвогрунтов. Например, авторами работы [12] был разработан специальный двухкомпонентный почвенный субстрат из отходов лесоперерабатывающего производства и канализационных очистных сооружений для рекультивации полигонов размещения ТКО. В работе [13] для получения плодородного субстрата к избыточному активному илу добавляли лигнин-шлам.

Цель исследования – оценка возможности использования отхода гидролизного лигнина, образовавшегося в результате деятельности Ивдельского лесозавода, для биологической рекультивации нарушенных земель.

Материалы и методы

Отход гидролизного лигнина, подвергшийся испытаниям в настоящей работе, был отобран с лигнинохранилища в г. Ивдель Свердловской области. Внешний вид отхода представлен на рис. 1. Отход был отобран с верхней части полигона методом квадрата в соответствии с ГОСТ 12071–2014¹.

¹ ГОСТ 12071-2014. ГРУНТЫ. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Введ. 2015-07-01. Москва : Стандартинформ, 2015. 12 с.



Рис. 1. Снимок гидролизного лигнина
Источник: фото В.М. Юрк, А.А. Шашкова.

В соответствии с ФККО² гидролизный лигнин относится к группе 3 01 212 00 00 0 «Лигнин от переработки сельскохозяйственного сырья» без указания класса опасности отхода. В связи с этим необходимо установить класс опасности для определения возможных путей его дальнейшего использования. Класс опасности отхода был определен в соответствии с методическими рекомендациями³ по воздействию его водной вытяжки на тест-культуру. В качестве тест-культуры использовали красный клевер *Trifolium pratense* L.

Дополнительно был проведен расчет класса опасности отхода по Критериям отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду⁴. Элементный анализ субстратов проводился методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (ARL Advant’X 4200, TermoFisher Scientific Inc., США). Для расчета содержания гумуса в почвогрунте полученное содержание углерода умножали на коэффициент

² Федеральный классификационный каталог отходов // Росприроднадзор : Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: <https://rpn.gov.ru/fkko/> (дата обращения: 15.10.2024).

³ Русаков Н.В., Крятов И.А., Пиртахия Н.В., Тонкопий Н.И., Карцева Н.Ю., Стародубов А.Г. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности : методические рекомендации, МР 2.1. 7.2297-07. Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008.

⁴ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2014 № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» // КонтурНорматив. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=265683&ysclid=mb9lftoh6a87783084> (дата обращения: 15.10.2024).

1,724 согласно [14]. Содержание лигнина в отходе рассчитывали по приближительной брутто-формуле соединения $C_{31}H_{34}O_{11}$.

Анализ содержания питательных и водорастворимых компонентов в водной вытяжке субстратов проводился в соответствии с [14]. Были определены следующие показатели: сухой остаток водной вытяжки, прокаленный остаток, ионы кальция и магния, сульфат-ион. Также были измерены величины рН водной и солевой вытяжек гидролизного лигнина (рН-метр 4100, ООО НПП «Инфраспек-Аналит», Российская Федерация).

С целью установления возможности использования гидролизного лигнина для биологической рекультивации была определена его фитотоксичность. В качестве тест-культур были выбраны семена овса *Avena Sativa* L. и клевера лугового красного *Trifolium pratense* L. Обе культуры являются неприхотливыми к климатическим условиям, реагируют на состав субстрата, а также могут быть практически использованы при рекультивации реальных отвалов. В качестве субстратов для выращивания тест-культур использовали гидролизный лигнин и универсальный почвогрунт для рассады (контрольный опыт).

Эксперименты по оценке фитотоксичности проводили в различных условиях, указанных в табл. 1. Выращивание тест-культур осуществлялось на субстрате без добавок (опыты № 1–4), с внесением 2 мл удобрения «Аммофоска» в субстрат (опыты № 5–8), а также с внесением в субстрат удобрения «Аммофоска» и 1 мл биологического препарата, представляющего собой культуру азотфиксирующих бактерий (опыты № 9–12). Каждый опыт проводили в двух параллелях.

Оценку фитотоксичности проводили по следующей методике. Навеску сухого субстрата (фракция менее 1 мм) массой 80 г помещали в пластиковый горшочек и увлажняли. Добавляли удобрение или биопрепарат, а затем на глубину 1,0–1,5 см высевали семена тест-культуры. В каждый горшочек высеивали по 10 семян. Опытные посеы помещали в термостат воздушный ХТ 3/70 (производитель ЗАО «Пять океанов»). В течение эксперимента поддерживались постоянные условия: температура 25 ± 1 °С, длительность светового дня 16 ч, периодический полив по мере необходимости. Длительность эксперимента составляла 14 дней.

Азотфиксирующие бактерии выделяли из дерново-подзолистой почвы. Для этого 10 г измельченной почвы добавляли в 100 мл жидкой элективной среды Бёрка и культивировали в течение 7 дней при 30 °С в шейкере-инкубаторе BIOSAN ES-20 с числом оборотов 250 мин^{-1} . Затем бактерии отделяли от дрожжей путем посева на твердую среду Бёрка. Полученные колонии бактерий вновь добавляли в жидкую среду. По подсчетам бактерий цитофлуориметрическим методом количество клеток в 1 мл суспензии составляет $5,9 \times 10^7$ шт./мл.

Таблица 1. Условия проведения экспериментов по оценке фитотоксичности

№ опыта	Субстрат	Тест-культура	Удобрение	Биопрепарат
1	Почвогрунт	<i>Avena Sativa</i> L.	–	–
2	Почвогрунт	<i>Trifolium pratense</i> L.	–	–
3	Гидролизный лигнин	<i>Avena Sativa</i> L.	–	–
4	Гидролизный лигнин	<i>Trifolium pratense</i> L.	–	–
5	Почвогрунт	<i>Avena Sativa</i> L.	+	–
6	Почвогрунт	<i>Trifolium pratense</i> L.	+	–
7	Гидролизный лигнин	<i>Avena Sativa</i> L.	+	–
8	Гидролизный лигнин	<i>Trifolium pratense</i> L.	+	–
9	Почвогрунт	<i>Avena Sativa</i> L.	+	+
10	Почвогрунт	<i>Trifolium pratense</i> L.	+	+
11	Гидролизный лигнин	<i>Avena Sativa</i> L.	+	+
12	Гидролизный лигнин	<i>Trifolium pratense</i> L.	+	+

Источник: составлено В.М. Юрк, А.А. Шашковой.

Оценка фитотоксичности субстрата проводилась по следующим показателям: всхожесть семян, сухая биомасса растений, длина проростков и корней, иные визуально регистрируемые негативные изменения в разных частях растений.

Результаты и обсуждение

Оценка возможности использования отходов производства в первую очередь связана с определением их токсичности и класса опасности, что напрямую влияет на оформление процедуры обращения с отходом и возможные варианты его переработки. Для целей биологической рекультивации подойдут только неопасные и нетоксичные отходы, которые не будут способствовать миграции загрязняющих веществ по пищевым цепочкам.

Фитотестирование водной вытяжки из гидролизного лигнина в соответствии с методическими рекомендациями⁵ показало следующие результаты. В анализируемой пробе проросло 19 ростков из 25 посаженных семян, а в контрольной (дистиллированная вода) – 16 из 25. Средняя величина корней в опытной пробе ($L_{оп} = 31$ мм) сопоставима со средней длиной корней в контрольной пробе ($L_{к} = 30$ мм), следовательно, отсутствует неблагоприятное воздействие отхода на растение. К тому же величина эффекта торможения E_t , рассчитанная по результатам опыта, составляет 3,3 %, т.е. менее 20 %, и, согласно методическим рекомендациям⁶, фитотоксическое действие не доказано. На рис. 2 приведены результаты тестирования водной вытяжки отхода.

Измерение водородного показателя водной и солевой вытяжек из гидролизного лигнина показало следующие результаты: $pH_{водн.} = 6,67$, $pH_{KCl} = 6,34$. Полученные данные свидетельствуют о слабокислой или нейтральной среде отхода, благоприятной для выращивания различных дикорастущих культур.

⁵ Русаков Н.В., Крятов И.А., Пирталия Н.В., Тонкопий Н.И., Карцева Н.Ю., Стародубов А.Г. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности: методические рекомендации, МР 2.1. 7.2297-07. Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008.

⁶ Там же.



Рис. 2. Результат фитотестирования водной вытяжки из гидролизного лигнина с красным клевером

Источник: фото В.М. Юрк, А.А. Шашкова.

Компонентный состав гидролизного лигнина и контрольного субстрата – универсального почвогрунта – приведены в табл. 2, в ней показаны данные только по основным компонентам субстратов.

Таблица 2. Содержание основных компонентов в составе гидролизного лигнина и почвогрунта

Гидролизный лигнин		Почвогрунт	
Компонент	Концентрация, % масс.	Компонент	Концентрация, % масс.
<i>Органическая часть</i>			
Лигнин / Lignin	58,97 ± 0,66	Гумус	52,29 ± 0,22
<i>Минеральная часть</i>			
SiO ₂	14,06 ± 0,19	SiO ₂	1,42 ± 0,07
CaO	6,54 ± 0,14	CaO	10,08 ± 0,18
Al ₂ O ₃	4,37 ± 0,1	Al ₂ O ₃	0,39 ± 0,02
SO ₃	4,36 ± 0,11	SO ₃	0,35 ± 0,02
Fe ₂ O ₃	2,94 ± 0,09	Fe ₂ O ₃	0,51 ± 0,03
MgO	0,84 ± 0,04	MgO	0,24 ± 0,01
<i>Питательные компоненты</i>			
SO ₃	4,36 ± 0,11	SO ₃	0,35 ± 0,02
P ₂ O ₅	1,79 ± 0,07	P ₂ O ₅	0,47 ± 0,02
Na ₂ O	0,48 ± 0,02	Na ₂ O	0,05 ± 0,003
K ₂ O	0,39 ± 0,02	K ₂ O	0,72 ± 0,04
N	0,20 ± 0,08	N	0,47 ± 0,08
<i>Тяжелые металлы</i>			
Mn	0,059 ± 0,003	Mn	0,018 ± 0,001
Zn	0,022 ± 0,0011	Zn	0,002 ± 0,001
Cu	0,020 ± 0,001	Cu	–
Cr	0,014 ± 0,0007	Cr	0,023 ± 0,001
V	0,0080 ± 0,0004	V	0,001 ± 0,0004
Pb	0,0073 ± 0,0016	Pb	–
As	0,0044 ± 0,0002	As	–
Ni	0,0030 ± 0,0004	Ni	–

Источник: составлено В.М. Юрк, А.А. Шашковой.

Как видно по результатам испытаний, основным компонентом отхода является лигнин – 58,97 % масс., который представляет собой полимер растительного происхождения, компонент древесины. Минеральная часть отхода представлена преимущественно оксидом кремния (14,06 % масс.). Присутствие минеральной фракции является благоприятным фактором, поскольку способствует улучшению физико-химических свойств грунтов, регулирует токсичность и кислотность сред, повышает устойчивость органических соединений. Исследованный гидролизный лигнин также содержит необходимые для роста и развития растений питательные элементы – P, Mg, Na, K, Ca, Mn, S, суммарная концентрация тяжелых металлов (V, Pb, As, Zn и др.) менее 0,15 % масс.

Содержание органической части, представленной гумусом, в контрольном субстрате немного меньше, чем в отходе. Следует отметить, что в контрольном почвогрунте присутствуют растительные остатки.

Интересно отметить, что питательных биогенных компонентов – N, P, K – в отходе больше, чем в почвогрунте. Также в отходе отмечается повышенное содержание серы по сравнению с контрольной почвой, что является следствием использования серной кислоты в процессе гидролиза древесины.

По результатам проведенных исследований можно заключить, что в составе гидролизного лигнина не содержатся токсические компоненты, а содержание питательных веществ не меньше, чем в контрольной почве. Расчет класса опасности в соответствии с Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2014 № 536⁷ показал, что отход может быть отнесен к V классу при подтверждении экспериментальным методом. Таким образом, рассматриваемый гидролизный лигнин может быть использован в качестве субстрата при проведении биологической рекультивации.

Внешний вид растений после проведения экспериментов по оценке фитотоксичности представлен на рис. 3. Как видно, через 14 дней после начала эксперимента не было зарегистрировано негативных изменений в образцах тест-растений. Обе тест-культуры во всех опытных условиях не проявляют никаких повреждений листьев или побегов, что подтверждает отсутствие в составе исследованного гидролизного лигнина токсичных биодоступных компонентов.

⁷ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 04.12.2014 № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» // КонтурНорматив. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=265683&ysclid=mb9lftoh6a87783084> (дата обращения: 15.10.2024).

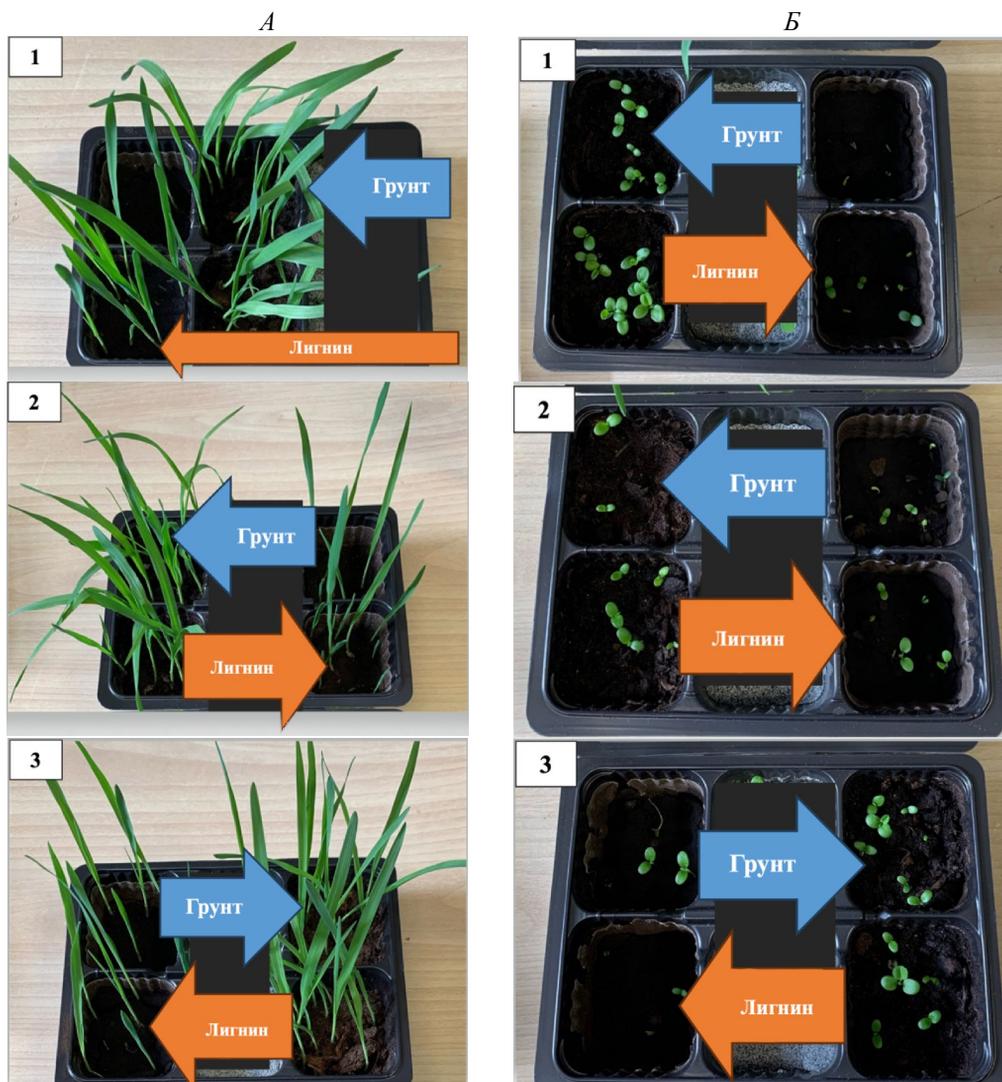


Рис. 3. Результаты фитотестирования гидролизного лигнина:

А – тест-культура овес (*Avena sativa* L.); *Б* – тест-культура красный клевер (*Trifolium pratense* L.);

1 – выращивание на субстрате без добавок; 2 – с добавлением удобрения «Аммофоска»;

3 – с добавлением удобрения «Аммофоска» и с биопрепаратом бактерий рода *Azotobacter*

Источник: фото В.М. Юрк, А.А. Шашкова.

Результаты измерений тестовых показателей опытных посевов культур на гидролизном лигнине и контрольном почвогрунте приведены в табл. 3.

Для всех опытов наблюдается более низкий процент всхожести тест-культур на гидролизном лигнине по сравнению с контрольным почвогрунтом. Это можно также наблюдать на рис. 3. Наибольшее значение биомассы также зафиксировано при выращивании тест-растений на почвогрунте.

Результаты эксперимента показали, что овес лучше всего произрастает на субстратах (гидролизном лигнине и почвогрунте), в которые дополнительно вносилось удобрение. Красный клевер лучше растет на субстратах без

внесения добавок. Это можно объяснить особенностями тест-культур и их различной потребностью в питательных компонентах в разные периоды роста и развития.

Таблица 3. Результаты измерений тестовых показателей опытных посевов культур на гидролизном лигнине и контрольном почвогрунте

Тест-культура	Без добавок		С удобрением		С биопрепаратом	
	Гидролизный лигнин	Почвогрунт	Гидролизный лигнин	Почвогрунт	Гидролизный лигнин	Почвогрунт
1	2	3	4	5	6	7
<i>Процент всхожести семян тест-культур, %</i>						
<i>Avena Sativa L.</i>	55	100	85	95	55	100
<i>Trifolium pratense L.</i>	60	75	65	45	30	60
<i>Сухая биомасса, г</i>						
<i>Avena Sativa L.</i>	0,185	0,375	0,225	0,420	0,155	0,410
<i>Trifolium pratense L.</i>	0,010	0,023	0,034	0,010	0,002	0,015
<i>Средняя длина проростков тест-культур, см</i>						
<i>Avena Sativa L.</i>	2,3	4,7	2,8	3,7	1,6	4,5
<i>Trifolium pratense L.</i>	1,5	3,1	1,4	0,8	0,7	1,8
<i>Средняя длина корня тест-культур, см</i>						
<i>Avena Sativa L.</i>	10,5	9,6	12,4	10,7	10,5	11,8
<i>Trifolium pratense L.</i>	2,6	2,4	2,2	1,3	1,0	1,5

Источник: составлено В.М. Юрк, А.А. Шашковой.

Необходимо отметить, что гидролизный лигнин содержит достаточное количество питательных элементов, однако не дает большой прирост биомассы по сравнению с контрольными пробами. Возможно, эти элементы находятся в недоступных для растений формах, поэтому внесение удобрения оказывает положительный эффект на рост тест-культур.

На среднюю длину проростков и корней добавление удобрения практически не влияет. При этом дополнительное внесение биопрепарата снижает значение данных показателей у обеих тест-культур, выращенных на гидролизном лигнине. Образцы, выращенные на почвогрунте, показывают меньшую восприимчивость к присутствию бактерий. Как показали результаты исследований, внесение биопрепарата, который представляет собой бактерии рода *Azotobacter*, оказалось неэффективным в случае проращивания растений на гидролизном лигнине. Возможная причина этого – обильное размножение и питание микроорганизмов минеральными элементами, которых становится недостаточно для удовлетворения потребностей растений.

В целом значения показателей всхожести и развития растений можно считать удовлетворительными, что указывает на перспективность использования гидролизного лигнина для биологической рекультивации.

Результаты химического анализа водной вытяжки из гидролизного лигнина и почвогрунта представлены в табл. 4. Наблюдаемые значения показателя сухого остатка позволяют сделать вывод, что отход содержит больше растворимых примесей, чем контрольный грунт. Причем половина этих примесей представлена растворимыми в воде органическими веществами (что можно определить по разнице между сухим и прокаленным остатком). Несмотря на это, рост и развитие тест-культур проходят лучше на контрольном почвогрунте, чем на исследуемом отходе гидролизного лигнина. Вероятно, часть минеральных компонентов в составе водной вытяжки из раствора не относится к питательным элементам, необходимым растениям для прорастания семян и развития проростков.

Возможно, при использовании гидролизного лигнина для рекультивации территорий в процессе его разложения, зарастания травянистыми культурами и развития почвенного биоценоза почвенный раствор будет подкисляться, что приведет к дополнительному выщелачиванию питательных компонентов. Однако на начальном этапе рекультивации такого происходить явно не будет и в качестве питательных добавок можно рассмотреть другие удобрения, которые будут содержать кальций, магний и прочие полезные компоненты, необходимые растениям.

Также следует отметить, что, несмотря на большее валовое содержание серы в гидролизном лигнине, в водной вытяжке сульфатов меньше, чем в контрольной почве. Низкую концентрацию сульфат-ионов можно объяснить тем, что в работе рассматривался отход из лигнинохранилища, который уже некоторое время размещался на полигоне. В течение этого периода некоторое количество водорастворимых компонентов могло быть вымыто при инфильтрации поверхностного стока. Сульфат-ион может образовывать малорастворимые соли с некоторыми металлами либо входить в состав продуктов гидролиза лигнина. Таким образом, данный компонент не будет ингибировать рост растений и негативно влиять на процесс рекультивации.

Таблица 4. Результаты химического анализа водных вытяжек из гидролизного лигнина и контрольного почвогрунта

Показатель	Ед. измерения	Гидролизный лигнин	Почвогрунт
Сухой остаток	%	1,395	0,86
Прокаленный остаток	%	0,71	0,59
Ионы кальция	мг-экв/100 г	1,0	0,15
Ионы магния	мг-экв/100 г	–	0,03
Сульфат-ионы	мг-экв/100 г	0,17	0,25

Источник: составлено В.М. Юрк, А.А. Шашковой.

Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что рассматриваемый гидролизный лигнин не содержит токсичных компонентов и не оказывает фитотоксического действия на тест-культуры, что указывает на перспективу его использования в качестве субстрата для выращивания растений. Однако,

несмотря на достаточное количество питательных компонентов, таких как фосфор, азот, калий и натрий, рост и развитие тест-культур овса и клевера красного происходит достаточно медленно. Это может быть связано с присутствием этих элементов в составе отхода в недоступной растениям форме или недостатком других важных компонентов, например магния, необходимого на этапе прорастания семени, а также роста и развития проростка.

Для проведения биологической рекультивации использование данного отхода экономически целесообразно, поскольку позволит сократить занимаемые под его размещение площади и снизить экологический ущерб. Наиболее быстрый результат зарастания рекультивируемых участков могут дать смеси гидролизного лигнина с другим, более питательным субстратом. В таком случае лигнин будет играть роль структуратора почвы.

С учетом удаленного расположения некоторых лесоперерабатывающих предприятий не всегда есть возможность добавлять к рекультивационному материалу питательные субстраты без ущерба для существующих экосистем. Поэтому в перспективе практический и научный интерес также представляют посевы на одном субстрате различных видов культур растений и микроорганизмов, способных сформировать устойчивый биоценоз. Подбор совокупности видов может способствовать более быстрому процессу почвообразования с участием гидролизного лигнина.

Список литературы

- [1] *Шорыгина Н.Н., Резников В.М., Елкин В.В.* Реакционная способность лигнина. Москва : Наука, 1976. 368 с.
- [2] *Чудаков М.И.* Промышленное использование лигнина. Москва : Гослесбумиздат, 1962. 183 с.
- [3] *Никишов В.Д.* Комплексное использование древесины. Москва : Лесн. пром-сть, 1985. 264 с.
- [4] *Симкин Ю.Я., Лемешевский А.И.* Перспективные направления переработки гидролизного лигнина из хранилищ // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики : в 3 томах. Том 2 / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнева, 2019. С. 503–505. EDN: SYOQHT
- [5] *Валюжинич М.А.* Сжигание гидролизного лигнина и фрезерного торфа в котельной установке с предтопком кипящего слоя // Новости теплоснабжения. 2011. № 4. С. 33–38.
- [6] *Wrzesniewska-Tosik K., Tomaszewski W., Struszczyk H.* Manufacturing and thermal properties of Lignin-based resins // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2001. Vol. 9, no. 2. P. 50–53.
- [7] *Капустина И.Б., Якимцов В.П., Казаян В.И.* Применение гидролизного лигнина для получения композиционных материалов // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. Т. 11, № 3. С. 489–492. EDN: OXP1FJ
- [8] *Маркелов Д.А., Ницак О.В., Геращенко И.И.* Сравнительное изучение адсорбционной активности медицинских сорбентов // Химико-фармацевтический журнал. 2008. Т. 42, № 7. С. 30–33. EDN: TLROUX

- [9] *Беляев Е.Ю.* Получение и применение древесных активированных углей в экологических целях // *Химия растительного сырья*. 2000. № 2. С. 5–15. EDN: HYRHSB
- [10] *Михайлов А.В.* Открытая разработка хранилища лигнина // *Записки Горного института*. 2017. Т. 223. С. 44–50. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.44> EDN: YGCWLJ
- [11] *Волчатова И.В., Медведева С.А.* Эффективность удобрения на основе гидролизного лигнина на серой лесной почве // *Агрохимия*. 2014. № 11. С. 30–33. EDN: SYIVXF
- [12] *Борматенков А.М., Графова Е.О., Зайцева М.И., Сюньев В.С.* Использование смеси осадков сточных вод и отходов лесоперерабатывающего производства как почвенного субстрата для рекультивации нарушенных земель // *Resources and Technology*. 2020. Т. 17, № 2. С. 97–113. <https://doi.org/10.15393/j2.art.2020.5342> EDN: OMMAUW
- [13] *Пашкевич М.А., Петрова Т.А., Рудзиси Э.* Оценка потенциальной возможности использования лигнин-шламов для лесохозяйственной рекультивации нарушенных земель // *Записки Горного института*. 2019. Т. 235. С. 106–112. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.1.106> EDN: VJFLBU
- [14] *Расворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н.* Химический анализ почв. Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского университета. 1995. 264 с. EDN: TJQFRD

Сведения об авторах:

Юрк Виктория Михайловна, кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии, химико-технологический институт, Уральский федеральный университет, Российская Федерация, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. ORCID: 0000-0002-5261-742X; eLIBRARY SPIN-код: 2477-3934. E-mail: v.yurk@yandex.ru

Шашкова Александра Артемовна, студент бакалавриата кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии, химико-технологический институт, Уральский федеральный университет, Российская Федерация, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. E-mail: aleksa_shashkova2207@mail.ru

Снегирев Вячеслав Алексеевич, ассистент кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии, химико-технологический институт, Уральский федеральный университет, Российская Федерация, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. ORCID: 0000-0002-6348-4271. E-mail: v.a.snegirev@urfu.ru

Третьякова Наталья Александровна, кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии топлива и промышленной экологии, химико-технологический институт, Уральский федеральный университет, Российская Федерация, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. ORCID: 0000-0003-3319-270X; eLIBRARY SPIN-код: 3385-5894. E-mail: n-tretyakova@mail.ru