Химия растительного сырья. 2025. №4. С. 456–465.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2025, no. 4, pp. 456–465.
DOI: 10.14258/jcprm.20250418019

УДК 631.811+635.152+544.47

ВЛИЯНИЕ ЛИГНОКИСЛОТ, ПОБОЧНОГО ПРОДУКТА ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СОСНОВОЙ И ОСИНОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ В ВАНИЛИН И ЦЕЛЛЮЛОЗУ, НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН РЕДИСА *RAPHANUS SATIVUS VAR RADICULA*

© ***М.А. Смирнова**, В.Е. Тарабанько, К.Л. Кайгородов, А.В. Корсаков, В.А. Голубков, Ю.В. Челбина***

Институт химии и химической технологии СО РАН, ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, 50/24, Красноярск, 660036, Россия, smirnova.ma@icct.krasn.ru

Изучена ростостимулирующая активность лигнокислот (ЛК), побочных продуктов каталитического окисления сосновой и осиновой древесины в ванилин и целлюлозу. Применение ЛК открывает возможность утилизации сточных вод каталитической переработки древесины. Проведена оценка ростостимулирующей активности ЛК на семенах редиса *Raphanus sativus var radicula* в лабораторных условиях при проращивании на фильтровальной бумаге, определены энергия прорастания, всхожесть, длины корней и гипокотиля. Ростостимулирующая активность ЛК оценивалась в сравнении с проращиванием семян редиса в воде и растворах гидрокарбоната калия. Показано, что более отчетливым ростостимулирующим эффектом обладают ЛК, выделенные при окислении древесины сосны в концентрациях 5–40 мг/л, по сравнению с лигнокислотаами, выделенными из реакционных растворов окисления древесины осины. Установлено, что эффект ростостимулирования возрастает в ряду ЛКОсины < ЛКСосны << ЛК Костры льна. Это соответствует снижению содержания метоксильных групп в различных лигнинах. Лигнокислоты, выделенные при окислении лигнинов травянистых растений, сельскохозяйственных отходов, представляются более перспективными для использования в качестве ростостимуляторов.

Ключевые слова: лигнокислоты, ростостимуляторы, редис, *Raphanus sativus var radicula*, древесина сосны и осины, каталитическое окисление, ванилин, целлюлоза.

Для цитирования: Смирнова М.А., Тарабанько В.Е., Кайгородов К.Л., Корсаков А.В., Голубков В.А., Челбина Ю.В. Влияние лигнокислот, побочного продукта окислительной переработки сосновой и осиновой древесины в ванилин и целлюлозу, на прорастание семян редиса *Raphanus sativus var radicula* // Химия растительного сырья. 2025. №4. С. 456–465. https://doi.org/10.14258/jcprm.20250418019.

Введение

Известно, что гуминовые вещества обладают ростостимулирующей активностью и такая активность интенсивно исследуется [1–3]. На современном рынке представлено большое количество разработанных гуминовых препаратов в виде гуматов, в основном получаемых из торфа и углей. Их ростостимулирующая активность проявляется в достаточно низких концентрациях 5–15 мг/л (0.001%) в рабочих растворах.

В настоящее время исследован широкий ассортимент сельскохозяйственных растений и показан прирост урожаев при использовании гуматов в качестве ростостимуляторов. Например, для картофеля урожайность повышается на 30% [4, 5], томатов – на 20% [6, 7], белокочанной капусты – на 10% [8], пшеницы – на 10–15% [3, 9], овса – на 5% [10, 11].

Гуминовые вещества – химически неоднородные соединения, содержащие в своем составе различные функциональные группы. На сегодняшний день в химической структуре гуминовых веществ установлено более десятка различных типов групп, такие как карбоксильные, фенольные и спиртовые гидроксильные, метоксильные и др. [12, 13], однако механизм их ростостимулирующего действия до сих пор не выяснен.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Основные способы получения гуминовых ростостимуляторов – экстракция щелочами гуминовых веществ из торфа, углей и других видов сырья, а также их окисление в щелочных растворах [14–18]. При окислении лигнина растительного сырья (древесины, травянистых растений, сельскохозяйственных отходов) образуются ванилин и целлюлоза. Побочными продуктами таких процессов являются лигнокислоты, продукты глубокого окисления лигнинов [19, 20]. Получаемые таким образом лигнокислоты (ЛК), в отличие от сульфатных и сульфитных лигнинов, не содержат серы и, в отличие от гуминов, выделяемых из углей, не содержат опасных полициклических ароматических соединений. Лигнокислоты можно выделять из водной фазы процессов окисления лигнина после извлечения из нее ванилина. Это сократит негативное технологическое давление на окружающую среду. Промышленное использование лигнинов весьма ограничено, и утилизация таких отходов является актуальной задачей [21].

В работе [22] установлена высокая ростостимулирующая активность ЛК, полученных в процессе окисления костры льна, обогащенного лигнином отхода производства льноволокна. Проращивание семян редиса показало, что лигнокислоты в невысоких концентрациях 5–150 мг/л повышают скорость роста корней и ростка в 2–3 раза. При выращивании редиса в почве в полевых условиях полив раствором лигнокислот привел к приросту массы плодов на 140–150% и биомассы растения на 70–180%.

Влияние природы растительного сырья, используемого для получения ванилина, на ростостимулирующие свойства получаемых лигнокислот ранее не исследовалось. Выходы ванилина, а также сиреневого альдегида, при окислении лигнинов хвойных и лиственных пород соответственно превышают результаты окисления лигнинов травянистых растений. По этим причинам цель настоящей работы заключается в исследовании ростостимулирующих свойств лигнокислот, получаемых в качестве побочного продукта переработки древесного сырья, сосны и осины, в ванилин и целлюлозу.

Экспериментальная часть

В работе использовали гидрокарбонат калия квалификации «хч», лигнокислоты, выделенные из остаточного раствора после каталитического окисления опилок сосновой (*Pinus sylvestris L.*) и осиновой (*Populus tremula L.*) древесины. Окисление проводили в автоклаве из нержавеющей стали емкостью 1 л. Условия окисления: 25 г опилок древесины, фракция 1–2 мм, 500 мл 5% раствора гидроксида натрия, 37 г пятиводного сульфата меди для получения катализатора, парциальное давление кислорода 2 атм, 160 °С, варьируемая продолжительность окисления, скорость вращения пропеллерной мешалки 1200 мин$^{-1}$.

Лигнокислоты осаждали из полученного раствора подкислением до pH 2. Получено два образца ЛК окислением сосновой древесины в течение 11 и 30 мин при 160 °С и один – окислением при 200 °С в течение 15 мин. Окисление осиновой древесины проводили при 160 °С в течение 40 мин. Выход лигнокислот составляет около 17–25% в расчете на лигнин древесины. Некоторые характеристики аналогичных лигнокислот представлены в [22, 23]. Осадки лигнокислот (10 г/л) растворяли в растворах гидрокарбоната калия (10 г/л), и значения их pH составляли 7.59 и 7.64 для ЛК, выделенных из сосновой и осиновой древесины, соответственно. Из них готовили поливочные растворы разбавлением до нужных концентраций.

Проращивание семян редиса *Raphanus sativus var radicula* сорта Жара под действием лигнокислот и гидрокарбоната калия выполняли согласно методике [24]. Культура редиса была выбрана вследствие его быстрых сроков прорастания (до 8 суток). Сорт Жара отличается скороспелостью, среднеустойчив к цветушности (стеблеванию).

В чашки Петри помещали 2 слоя фильтровальной бумаги, семена размещали на увлажненной исследуемым раствором бумаге по 10 шт. семян в каждом образце. Чашки Петри выдерживали в темноте при 5 °С в течение 3 сут., затем при 25 °С на свету до 8 сут. Воду в ходе эксперимента добавляли каждые сутки для восполнения потери массы образцов испарением. Оценивали энергию прорастания (доля нормально проросших семян на 4 сутки), всхожесть (доля нормально проросших семян на 8 сутки), а также измеряли длину корней и гипокотиля растений (нижний участок стебля – от места перехода стебля в корень до первых зародышевых листьев). Для сравнения проводили аналогичное проращивание семян в растворе гидрокарбоната калия той же массовой концентрации и в воде.

Обработку результатов проводили методом наименьших квадратов. Стандартное отклонение, (ошибку единичного измерения) и его коэффициент вариации (относительная ошибка измерения, выраженная в процентах) V вычисляли по известным формулам:

$$S_{измерен.} = \frac{\sqrt{S(X_i - X_{средн.})^2}}{n-1} \quad (1)$$

$$V = \frac{S_{измерен.}}{X_{средн.}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Результаты и обсуждение

Окисление опилок сосновой древесины кислородом в условиях высокоинтенсивного перемешивания (импеллерная мешалка, двигатель 200 ватт) дает максимум концентрации ванилина (5 г/л реакционной массы, 36 мас.% в расчете на лигнин) в области 9–12 мин (рис. 1). По этой причине в настоящей работе в основном рассмотрены ростостимулирующие свойства лигнокислот, полученных после окисления нативного лигнина сосновой древесины в течение 11 мин.

В таблице 1 представлены результаты по влиянию лигнокислот, выделенных при окислении сосновой, осиновой древесины, а также гидрокарбоната калия на усреднённые энергию прорастания (четвертые сутки роста) и всхожесть (восьмые сутки) семян редиса. Лигнокислоты из лигнина сосны повышают энергию прорастания семян с 60 до 80%, а их всхожесть – с 80–90% вплоть до 100%. Лигнокислоты, полученные окислением лигнина осиновой древесины, на эти показатели практически не влияют. Для сравнения отметим, что ЛК, полученные из костры льна, более эффективны и повышают энергию прорастания с 60 до 95% [22].

На рисунке 2 представлены данные по влиянию концентрации этих ЛК на длину корней и гипокотиля в зависимости от времени прорастания семян редиса на фильтровальной бумаге, а в таблице 2 – усредненные расчетные результаты, в том числе относительная среднеквадратичная ошибка измерения длины корней, стандартное отклонение, деленное на среднеарифметическое значение измеряемой длины корня или гипокотиля.

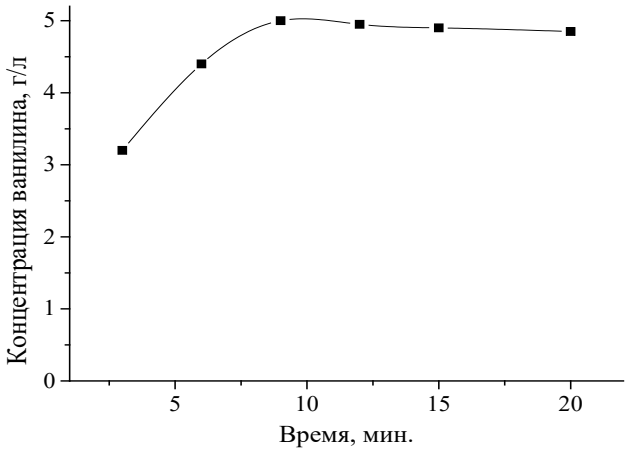

Рис. 1. Зависимость концентрации ванилина в реакционной массе от продолжительности процесса окисления сосновой древесины

Таблица 1. Влияние лигнокислот, выделенных при окислении сосновой, осиновой древесины и гидрокарбоната калия на усредненные энергию прорастания (четвертые сутки роста), всхожесть (восьмые сутки) семян редиса

Состав поливочного раствора	Энергия прорастания, %	Всхожесть семян, %
Вода дистиллированная	60	90
$KHCO_3$, 5–40 мг/л	60	80
ЛК из сосны		
ЛК-160-11, 5–40 мг/л		95
ЛК-160-30, 5–40 мг/л	79	100
ЛК-200-20, 5–40 мг/л	80	100
ЛК из осины		
ЛК-160-40, 5–40 мг/л	60	96

Сокращения: ЛК-160-11 (ЛК-T-t) – лигнокислоты, полученные окислением при температуре 160 °C и продолжительности окисления 11 мин.

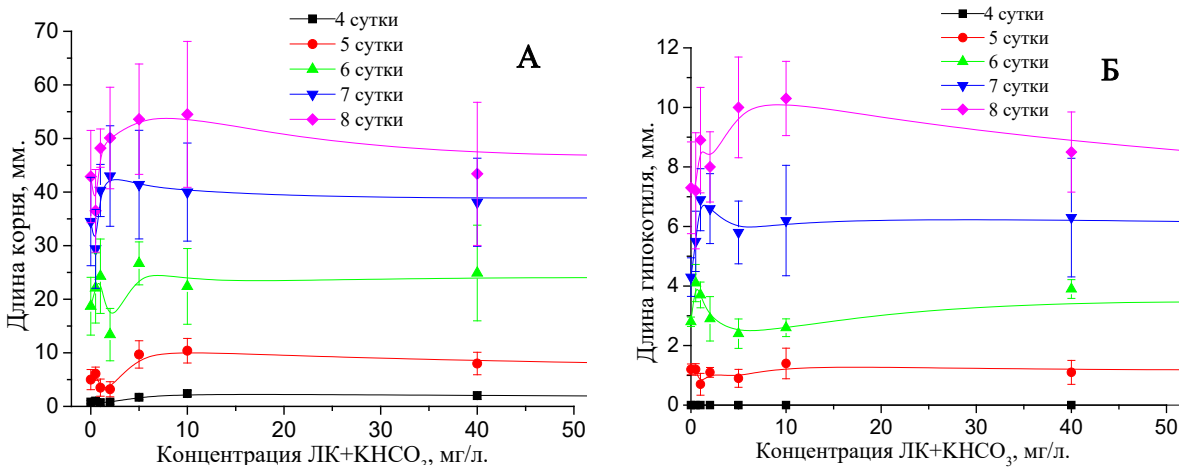

Рис. 2. Зависимости длины корней (А) и гипокотиля (Б) от продолжительности проращивания и концентрации калиевых солей лигнокислот, полученных окислением сосновой древесины при 160 °С в течение 11 мин

Таблица 2. Влияние концентрации калиевой соли лигнокислот, полученных после окисления древесины сосны в течение 11 мин, на длину корня редиса, проращиваемого на фильтровальной бумаге в течение 8 суток

№	Концентрация ЛК, мг/л	Длина корня, мм									
		4 сутки	V*, %	5 сутки	V*, %	6 сутки	V*, %	7 сутки	V*, %	8 сутки	V*, %
1	0	1.2	38	5	37	18.7	29	34.5	24	42.9	20
2	0.5	1	43	6.1	20	22.1	30	29.4	25	36.5	21
3	1	0.7	68	3.5	46	24.3	28	40.3	12	48.2	7.3
4	2	0.8	56	3.2	44	13.4	36	43	22	50.1	19
5	5	1.7	26	9.7	26	26.7	15	41.4	24	53.6	19
6	10	2.4	22	10.4	22	22.4	31	40	23	54.5	25
7	40	2	35	8	26	24.9	36	38.1	22	43.4	31
8	160	1.1	38	6.1	31	22.2	37	41.2	19	52.9	20

*V – коэффициент вариации (относительная ошибка измерения, выраженная в процентах, см. уравнение (2)).

Полученные результаты показывают, что ростостимулирующий эффект малых концентраций ЛК почти не проявляется. Расчеты, проведенные по полному массиву результатов по влиянию малой концентрации лигнокислот (0.5 мг/л, 280 измерений), полученных окислением сосновой древесины, показывают, что стимулирование роста корня и гипокотиля такой концентрацией лигнокислот практически не проявляется (РСЭ=0.89±0.09). Заметный ростостимулирующий эффект малых концентраций ЛК (1–2 мг/л) проявляется только на шестые-восьмые сутки проращивания, а на начальном этапе проращивания (четвертые-пятые сутки) он отсутствует.

Отчетливо наблюдаемый эффект ростостимулирования наблюдается в области концентраций ЛК 5–40 мг/л, и для дальнейшего обсуждения полученные результаты усредняли для этой области концентраций по всем временам проращивания. Коэффициент вариации (уравнение (2)), относительное значение стандартного отклонения измеряемой длины корня и гипокотиля, довольно велик (15–68%) и имеет тенденцию к снижению при увеличении времени прорастания (34–54% на седьмые-восьмые сутки). Эта величина характеризует ошибку единичного измерения, а ошибка среднего арифметического, т.е. значения измеряемой величины, втрое меньше при числе измерений n=10:

$$S_{среднеарифм.} = \frac{S_{измерен.}}{\sqrt{(n-1)}} \qquad (3)$$

С учетом этих общепринятых статистических методов оценки ошибок представленные ниже результаты оказываются достаточно надежными.

В таблице 3 представлены усредненные результаты по ростостимулирующему эффекту (РСЭ) трех образцов ЛК, полученных окислением сосновой древесины при различных температурах (160 и 200 °С) и продолжительностях (11–40 мин) процесса. Систематические зависимости РСЭ от продолжительности проращивания семян практически не проявляются, поэтому данные по эффективности каждого образца усреднены по времени. Кроме лигнокислот, полученных из сосновой древесины, в таблице 3 представлены аналогичные результаты по ростостимулирующей активности лигнокислот, полученных окислением лигнина осиновой древесины и для сравнения – литературные данные [22] по ростостимулирующей активности лигнокислот, полученных из костры льна.

Ростостимулирующий эффект лигнокислот, полученных окислением осиновой древесины, не проявляется в пределах ошибки на полученном массиве результатов. Ростостимулирующий эффект ЛК из сосны на массиве данных по длине гипокотиля имеет среднее значение около 11%, что близко к ошибке измерения, но этот результат получен на массиве из 450-ти единичных измерений. Наиболее отчетливо ростостимулирующий эффект ЛК сосновой древесины проявляется на результатах по росту корней, выходит за пределы ошибки измерения и составляет 29% к контролю.

Таблица 3. Стимулирование роста корней и гипокотиля редиса лигнокислотами концентрацией 5–40 мг/л

№	Концентрация ЛК, мг/л	Длина корня и гипокотиля редиса, мм						
		4 сутки	5 сутки	6 сутки	7 сутки	8 сутки	РСЭ средний	$S_{РСЭ}$
ЛК из сосны								
ЛК-160-11, корень	0	1.2	5.0	18.7	34.5	42.9		
	5–40	2.03	9.37	24.7	39.8	50.5		
	РСЭ	1.69	1.87	1.32	1.15	1.10	1.31	0.33
ЛК-160-11, гипокотиль	0	0	1.2	2.8	4.3	7.3		
	5–40	0	1.13	2.97	6.1	9.6		
	РСЭ	–	0.94	1.06	1.42	1.31	1.18	0.22
ЛК-160-30, корень	0	1.5	8.6	15.8	31.7	40.4		
	5–40	2.23	10.0	19.9	40.6	49.3		
	РСЭ	1.49	1.16	1.26	1.28	1.22	1.28	0.12
ЛК-160-30, гипокотиль	0	0.5	1.4	2.9	4.9	5.9		
	5–40	0.4	1.83	2.83	5.3	6.1		
	РСЭ	0.8	1.31	0.98	1.08	1.03	1.04	0.18
ЛК-200-20, корень	0	1.5	8.6	15.8	31.7	40.4		
	5–40	2.23	10.0	19.9	40.6	49.3		
	РСЭ	1.49	1.16	1.26	1.28	1.22	1.28	0.13
ЛК-200-20, гипокотиль	0	0	1.4	2.9	4.9	5.9		
	5–40	0.3	2.1	2.6	4.8	6.5		
	РСЭ	–	1.50	0.90	0.98	1.10	1.12	0.27
РСЭ, усредненный по росту корней на ЛК сосны							1.29±0.04**	0.02*
РСЭ, усредненный по гипокотилю на ЛК сосны							1.11±0.17**	0.07*
ЛК из осины								
ЛК-160-40, корень	0	0.1	4.0	12.5	29.1	35.0		
	5–40	0.07	3.7	10.7	22.3	35.9		
	РСЭ	–	0.92	0.86	0.77	1.02	0.89	0.10
ЛК-160-40, гипокотиль	0	0	0	1.0	3.5	8.6		
	5–40	0	0	0.90	4.3	7.7		
	РСЭ	–	–	0.90	1.23	0.89	1.01	0.19
ЛК из костры льна [22]								
ЛК-160-40, корень	0	2.0	5.0	13.0	32.8	40.0		
	5–40	6.0	28.2	75.0	80.0	85.0		
	РСЭ	3.00	5.64	5.76	2.43	2.13	3.79	1.07
ЛК-160-40, гипокотиль	0	0	0	7.0	13.0	19.0		
	5–40	0	5.2	11.0	20.0	19.2		
	РСЭ	–	–	1.57	1.54	1.01	1.37	0.31

*Стандартное отклонение для трех расчетных результатов РСЭ среднего. **Доверительный интервал для вероятности p=0.95 с учетом коэффициента Стьюдента для n=3. РСЭ – усредненный по времени прорастания ростостимулирующий эффект, отношение длин корня или гипокотиля с добавкой ЛК и без нее.

Полученные результаты можно сопоставить с данными по ростостимулированию лигнокислотами, полученными окислением костры льна [22], где получены значения РСЭ=1.5–3. С учетом этих данных ростостимулирующий эффект возрастает в ряду растительных источников лигнокислот РСЭ (ЛК Осины) < РСЭ (ЛК Сосны) << РСЭ (ЛК Костры льна).

Формально этот ряд совпадает с известным рядом снижения содержания метоксильных групп в лигнинах лиственных, хвойных и травянистых растений соответственно [23, 25]. Это совпадение указывает на существование связи между ростостимулирующей эффективностью лигнокислот и содержанием метоксильных групп в них; следовательно, поиск эффективных ростостимуляторов целесообразно вести среди продуктов окисления лигнинов травянистых растений, пшеницы и других. Следует отметить также, что среди травянистых лигнин костры льна отличается низким содержанием неконденсированных фенилпропановых единиц (ФПЕ), дающих мономерные производные, пара-гидроксикоричную кислоту и пара-гидроксибензальдегид в процессах тиоацидолиза и нитробензольного окисления соответственно [25, 26].

По этой причине лигнин костры льна может содержать около 40% конденсированных пара-гидроксифенилпропановых структурных единиц [22]. Высокая степень конденсации лигнина костры льна по третьему и пятому положениям таких ФПЕ, включая образование связей между гидроксифенилпропановыми и гваяцилпропановыми структурными единицами, отмечена в [27]. Поэтому в качестве рабочей гипотезы можно предположить, что именно такие конденсированные ФПЕ в исследуемых лигнокислотах могут определять ростостимулирующий эффект.

Следует отметить, что наблюдаемый ростостимулирующий эффект ЛК, полученных из сосновой древесины, может частично маскироваться влиянием ионов калия, необходимых для перевода лигнокислот в растворимые соли. В таблице 4 представлены данные по влиянию растворов гидрокарбоната калия на прорастание семян редиса. Эти результаты показывают, что растворы $KHCO_3$ в концентрациях, использованных для приготовления растворов солей ЛК, статистически значимо ингибируют рост корней семян редиса, и скорость роста систематически снижается вплоть до двух раз при увеличении концентрации от нуля до 160–320 мг/л. Ингибирующий эффект роста гипокотиля растворами $KHCO_3$ во всем изученном интервале концентраций практически отсутствует, РСЭ=0.89±0.09.

Таблица 4. Ингибирование роста корней растворами гидрокарбоната калия

№	Концентрация ЛК, мг/л	Длина корня редиса, мм					
		4 сутки	5 сутки	6 сутки	7 сутки	8 сутки	РСЭ, среднее значение при постоянной концентрации
1	0	1.5	8.6	15.8	31.7	40.4	
2	0.5	1.2	7.7	16.5	33.5	40.2	
	РСЭ	0.8	0.89	1.04	1.06	1.00	0.96
3	1	0.8	5.7	12.8	24.8	34.9	
	РСЭ	0.53	0.66	0.81	0.78	0.86	0.73
4	5	1	3.8	14.1	24.3	36.5	
	РСЭ	0.67	0.44	0.89	0.77	0.90	0.73
5	10	1.6	3.9	12	24.9	41.8	
	РСЭ	1.07	0.45	0.76	0.78	1.02	0.82
6	40	0.7	2.3	6.1	14.3	21.7	
	РСЭ	0.47	0.27	0.39	0.45	0.54	0.42
7	160	0.7	2.4	6.7	13.1	25.7	
	РСЭ	0.47	0.28	0.42	0.41	0.64	0.44
8	320	0.7	3.3	8.7	14.5	28.2	
	РСЭ	0.47	0.38	0.55	0.46	0.70	0.51
РСЭ, среднее значение по всему массиву							0.66

Заключение

В настоящей работе исследована ростостимулирующая активность лигнокислот, выделенных при окислении сосновой и осиновой древесины в ванилин и целлюлозу, на семенах редиса *Raphanus sativus var radicula* в лабораторных условиях. Показано, что отчетливый ростостимулирующий эффект (РСЭ) проявляется на ЛК, выделенных при окислении сосновой древесины в концентрациях 5–40 мг/л.

Установлено, что ростостимулирующая активность возрастает в ряду ЛК Осины < ЛК Сосны << ЛК Костры льна, что соответствует снижению содержания метоксильных групп в различных лигнинах. Таким образом, лигнины травянистых растений, сельскохозяйственных отходов представляются более перспективными для выделения ЛК и использования их в качестве ростостимуляторов. Полученные результаты указывают на связь ростостимулирующего эффекта лигнокислот с высоким содержанием конденсированных *пара*-гидроксифенилпропановых структурных единиц в структуре лигнинов.

Финансирование
Исследование выполнено за счет Гранта Российского научного фонда № 25-26-20104 (https://rscf/project/25-26-20104) и Гранта Красноярского краевого фонда науки с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Конфликт интересов
Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ
Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. Physiological effects of humic substances on higher plants // Soil Biology and Biochemistry. 2002. Vol. 34. Pp. 1527–1536.
2. Berbara R.L.L., Garcia A.C. Humic substances and plant defense metabolism // Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment. New York: Springer, 2014. Pp. 297–319. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8591-9_11.
3. Кривошеев С.И., Шумаков В.А. Использование ростостимулирующих биопрепаратов для предпосевной обработки семян в первичном семеноводстве озимой пшеницы // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. №6. С. 665–668. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_6654.
4. Полиенко Е.А. Влияние гуминовых удобрений на урожайность картофеля // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. №9. С. 48–49.
5. Анохина О.В., Кадуров А.А. Влияние гуминовых препаратов на урожайность картофеля // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32, №12. С. 34–35. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11209.
6. Пронько Н.А., Пронько В.В., Степанченко Д.А. Влияние гуминовых препаратов на продуктивность томата на орошаемых каштановых почвах саратовского заволжья // Аграрный научный журнал. Естественные науки. 2017. №9. С. 24–27.
7. Назранов Х.М., Назранов Б.Х. Влияние использования лигногумата на урожайность и качественные параметры томата в овощном севообороте // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2022. №3(37). С. 18–25. https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-3-37-18-25.
8. Малхасян А.Б., Соловьёва М.В., Петрова О.Г., Романов П.В. Влияние гуминовых препаратов на формирование урожая и качество белокочанной капусты // Молочнохозяйственный вестник. 2022. Т. 47, №3. С. 104–119. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_104.
9. Пашкова Г.И., Кузьминых А.Н. Роль гуматов в повышении урожайности зерна яровой пшеницы // Вестник Марийского государственного университета. 2016. Т. 2, №1. С. 48–50.
10. Комарова Г.Н., Сорокина А.В. Влияние регулятора роста и развития растений гуминовой природы гумостим на овёс // Достижения науки и техники АПК. 2012. №5. С. 27–29.
11. Броварова О.В., Броварова Д.А. Гуминовые вещества торфа. Свойства и биологическая активность // Химия растительного сырья. 2023. №2. С. 301–309. https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211727.
12. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. СПб, 2004. 248 с.
13. Stevenson F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. New York, 1994. 512 p.
14. Дудкин Д.В., Федяева И.М. Малоотходная технология получения растворов гуминовых веществ из торфа различного ботанического состава и степени разложения // Химия растительного сырья. 2018. №2. С. 175–182. https://doi.org/10.14258/jcprm.2018023356.
15. Дудкин Д.В. Основы теории и технологии механохимической переработки древесных отходов и торфа в препараты гуминовой природы: автореф. дис. … докт. техн. наук. Красноярск, 2021. 40 с.
16. Ефанов М.В., Галочкин А.И., Черненко П.П. Получение оксигуматов натрия из торфа // Химия твердого топлива. 2008. №2. С. 24–28.
17. Ефанов М.В., Черненко П.П. Получение азотсодержащих гуминовых препаратов из торфа // Химия твердого топлива. 2010. №1. С. 67–71.
18. Ефанов М.В., Галочкин А.И., Шотт П.Р., Дудкин Д.В., Клепиков А.Г. Азотсодержащее органоминеральное удобрение на основе древесных отходов // Журнал прикладной химии. 2001. №10. С. 1719–1721.

19. Tarabanko V.E., Kaygorodov K.L., Kazachenko A.S., Smirnova M.A., Chelbina Yu.V., Kosivtsov Yu., Golubkov V.A. Mass transfer in the processes of native lignin oxidation into vanillin via oxygen // Catalysts. 2023. Vol. 13. 1490. https://doi.org/10.3390/catal13121490.
20. Tarabanko V.E., Tarabanko N. Catalytic oxidation of lignins into the aromatic aldehydes: general process trends and development prospects // International Journal of Molecular Sciences. 2017. Vol. 18. 2421. https://doi.org/10.3390/ijms18112421.
21. Чудаков М.И. Промышленное использование лигнина. М., 1983. 200 с.
22. Смирнова М.А., Тарабанько В.Е., Челбина Ю.В., Кайгородов К.Л., Орешина И.Д. Ростостимулирующая активность лигнокислот – побочного продукта окисления растительного сырья в ванилин и целлюлозу // Химия растительного сырья. 2024. №4. С. 427–437. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240415852.
23. Golubkov V.A., Tarabanko V.E., Kaigorodov K.L., Shestakov S.L., Chelbina Y.V., Smirnova M.A., Popov A.A., Skripnikov A.M., Vigul D.O., Borovkova V.S. Chemical processing of agricultural wastes into vanillin, pulp and glucose // Химия растительного сырья. 2023. №4. С. 137–145. https://doi.org/10.14258/jcprm.20230413782.
24. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М., 2011. 32 с.
25. Buranov A.U., Mazza G. Lignin in straw of herbaceous crops // Industrial Crops and Products. 2008. Vol. 28, no. 3. Pp. 237–259. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.03.008.
26. Tapin S., Sigoillot J.C., Asther M., Petit-Conil M. Feruloyl esterase utilization for simultaneous processing of nonwood plants into phenolics compounds and pulp fibers // J. Agric. Food Chem. 2006. Vol. 54. Pp. 3697–3703.
27. Tarabanko V.E., Vigul D.O., Kaygorodov K.L., Chelbina Y.V., Mazurova E.V. Catalytic oxidation of flax shives into vanillin and pulp // Catalysts. 2022. Vol. 12. 1003. https://doi.org/10.3390/catal12091003.

Поступила в редакцию 9 октября 2025 г.

Принята к публикации 4 ноября 2025 г.

Smirnova M.A.[*]*, Tarabanko V.E., Kaigorodov K.L., Korsakov A.V., Golubkov V.A., Chelbina Yu.V.* THE EFFECT OF LIGNOACIDS, A BYPRODUCT OF OXIDATIVE PROCESSING OF PINE AND ASPEN WOOD INTO VANILLIN AND CELLULOSE, ON THE OF RADISH (*RAPHANUS SATIVUS VAR. RADICULA*) SEEDS GERMINATION

Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS", Akademgorodok, 50/24, Krasnoyarsk, 660036, Russia, smirnova.ma@icct.krasn.ru

The growth-promoting activity of lignoacids (LA), byproducts of the catalytic oxidation of pine and aspen wood to vanillin and cellulose, was studied. The use of LA opens the possibility of recycling wastewater from the catalytic processing of wood. The growth-promoting activity of LA was assessed on radish seeds Raphanus sativus var. radicula under laboratory conditions during germination on filter paper; germination energy, germination rate, and root and hypocotyl lengths were determined. The growth-promoting activity of LA was compared to radish seed germination in water and potassium bicarbonate solutions. It was shown that LA isolated during pine wood oxidation at concentrations of 5–40 mg/L exhibited a more pronounced growth-promoting effect compared to lignoacids isolated from aspen wood oxidation reaction solutions. It has been established that the growth-promoting effect increases in the order LCOsins < Pine LKS < Flax shives. This corresponds to a decrease in the content of methoxyl groups in various lignins. Lignoacids released during the oxidation of lignins from herbaceous plants and agricultural waste appear more promising for use as growth stimulants.

Keywords: lignoacids, growth promoters, radish, *Raphanus sativus var. radicula*, pine and aspen wood, catalytic oxidation, vanillin, cellulose.

For citing: Smirnova M.A., Tarabanko V.E., Kaigorodov K.L., Korsakov A.V., Golubkov V.A., Chelbina Yu.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 4, Online First. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20250418019.

References

1. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, vol. 34, pp. 1527–1536.
2. Berbara R.L.L., Garcia A.C. *Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment*. New York: Springer, 2014, pp. 297–319. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8591-9_11.
3. Krivosheyev S.I., Shumakov V.A. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal*, 2022, no. 6, pp. 665–668. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_6654. (in Russ.).
4. Poliyenko Ye.A. *Mezhdunarodnyy zhurnal pri-kladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2011, no. 9, pp. 48–49. (in Russ.).

[*] Corresponding author.

5. Anokhina O.V., Kadurov A.A. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2018, vol. 32, no. 12, pp. 34–35. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11209. (in Russ.).
6. Pron'ko N.A., Pron'ko V.V., Stepanchenko D.A. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal. Yestestvennyye nauki*, 2017, no. 9, pp. 24–27. (in Russ.).
7. Nazranov Kh.M., Nazranov B.Kh. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova*, 2022, no. 3(37), pp. 18–25. https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-3-37-18-25. (in Russ.).
8. Malkhasyan A.B., Solov'yova M.V., Petrova O.G., Romanov P.V. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*, 2022, vol. 47, no. 3, pp. 104–119. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_104. (in Russ.).
9. Pashkova G.I., Kuz'minykh A.N. *Vestnik Mariyskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 48–50. (in Russ.).
10. Komarova G.N., Sorokina A.V. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2012, no. 5, pp. 27–29. (in Russ.).
11. Brovarova O.V., Brovarova D.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 2, pp. 301–309. https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211727. (in Russ.).
12. Popov A.I. *Guminovyye veshchestva: svoystva, stroyeniye, obrazovaniye*. [Humic substances: properties, structure, formation]. St. Petersburg, 2004, 248 p. (in Russ.).
13. Stevenson F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York, 1994, 512 p.
14. Dudkin D.V., Fedyayeva I.M. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 2, pp. 175–182. https://doi.org/10.14258/jcprm.2018023356. (in Russ.).
15. Dudkin D.V. *Osnovy teorii i tekhnologii mekhanokhimicheskoy pererabotki drevesnykh otkhodov i torfa v pre-paraty guminovoy prirody: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk*. [Fundamentals of the theory and technology of mechanochemical processing of wood waste and peat into humic preparations: abstract dis. ... Doctor of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 2021, 40 p. (in Russ.).
16. Yefanov M.V., Galochkin A.I., Chernenko P.P. *Khimiya tverdogo topliva*, 2008, no. 2, pp. 24–28. (in Russ.).
17. Yefanov M.V., Chernenko P.P. *Khimiya tverdogo topliva*, 2010, no. 1, pp. 67–71. (in Russ.).
18. Yefanov M.V., Galochkin A.I., Shott P.R., Dudkin D.V., Klepikov A.G. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2001, no. 10, pp. 1719–1721. (in Russ.).
19. Tarabanko V.E., Kaygorodov K.L., Kazachenko A.S., Smirnova M.A., Chelbina Yu.V., Kosivtsov Yu., Golubkov V.A. *Catalysts*, 2023, vol. 13, 1490. https://doi.org/10.3390/catal13121490.
20. Tarabanko V.E., Tarabanko N. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, vol. 18, 2421. https://doi.org/10.3390/ijms18112421.
21. Chudakov M.I. *Promyshlennoye ispol'zovaniye lignina*. [Industrial use of lignin]. Moscow, 1983, 200 p. (in Russ.).
22. Smirnova M.A., Taraban'ko V.Ye., Chelbina Yu.V., Kaygorodov K.L., Oreshina I.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no. 4, pp. 427–437. https://doi.org/10.14258/jcprm.20240415852. (in Russ.).
23. Golubkov V.A., Tarabanko V.E., Kaigorodov K.L., Shestakov S.L., Chelbina Y.V., Smirnova M.A., Popov A.A., Skripnikov A.M., Vigul D.O., Borovkova V.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 4, pp. 137–145. https://doi.org/10.14258/jcprm.20230413782.
24. *GOST 12038-84. Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti*. [GOST 12038-84. Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination]. Moscow, 2011, 32 p. (in Russ.).
25. Buranov A.U., Mazza G. *Industrial Crops and Products*, 2008, vol. 28, no. 3, pp. 237–259. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.03.008.
26. Tapin S., Sigoillot J.C., Asther M., Petit-Conil M. *J. Agric. Food Chem*., 2006, vol. 54, pp. 3697–3703.
27. Tarabanko V.E., Vigul D.O., Kaygorodov K.L., Chelbina Y.V., Mazurova E.V. *Catalysts*, 2022, vol. 12, 1003. https://doi.org/10.3390/catal12091003.

Received October 9, 2025

Accepted November 4, 2025

Сведения об авторах

Смирнова Марина Александровна – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических методов анализа материалов, smirnova.ma@icct.krasn.ru

Тарабанько Валерий Евгеньевич – доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физико-химических методов анализа материалов, veta@icct.ru

Кайгородов Константин Леонидович – младший научный сотрудник лаборатории физико-химических методов анализа материалов, kulik@icct.ru

Корсаков Артём Васильевич – лаборант лаборатории физико-химических методов анализа материалов, art.korsackoff@yandex.ru

Голубков Виктор Александрович – младший научный сотрудник лаборатории каталитических превращений возобновляемых ресурсов, golubkov.va@icct.krasn.ru

Челбина Юлия Вячеславовна – кандидат химических наук, младший научный сотрудник лаборатории физико-химических методов анализа материалов, agafon5@mail.ru

Information about authors

Smirnova Marina Aleksandrovna – Candidate of Chemical Sciences, research associate at the Laboratory of Physicochemical Methods of Material Analysis, smirnova.ma@icct.krasn.ru

Tarabanko Valery Evgenievich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Physicochemical Methods of Materials Analysis, veta@icct.ru

Kaigorodov Konstantin Leonidovich – Junior Researcher, Laboratory of Physicochemical Methods of Materials Analysis, kulik@icct.ru

Korsakov Artyom Vasilievich – Laboratory Assistant, Laboratory of Physicochemical Methods of Materials Analysis, art.korsackoff@yandex.ru

Golubkov Viktor Aleksandrovich – Junior Researcher, Laboratory of Catalytic Transformations of Renewable Resources, golubkov.va@icct.krasn.ru

Chelbina Yulia Vyacheslavovna – Candidate of Chemical Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Physicochemical Methods of Materials Analysis, agafon5@mail.ru