

**Агрохимия, агропочвоведение,
защита и карантин растений /
Agricultural Chemistry, Soil Science,
Plant Protection and Quarantine**

Научная статья

Original article

DOI: 10.12731/2658-6649-2027-19-1-1807

EDN: KFWRTQ

УДК 631.811+635.152+544.47



**Влияние лигнокислот, побочного продукта
окислительной переработки растительного сырья
в ванилин и целлюлозу, на проращивание семян редиса**

**М.А. Смирнова, В.Е. Тарабанько, А.В. Корсаков,
С.Н. Капаева, К.Л. Кайгородов, Н.С. Бухряков**

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения
Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
Красноярск, Российская Федерация*

Аннотация

Обоснование. Лигнокислоты (ЛК) – побочный продукт каталитического окисления растительного сырья в ванилин и целлюлозу. По составу они схожи с гуминовыми кислотами и могут обладать ростостимулирующей активностью. Поэтому изучение ростостимулирующих свойств ЛК для сельскохозяйственных растений представляется актуальным.

Цель. Изучение влияния условий окисления растительного сырья различных видов и условий проращивания редиса на ростостимулирующие свойства выделенных ЛК.

Материалы и методы. Оценивалась ростостимулирующая активность ЛК, выделенных из различных субстратов, на семенах редиса *Raphanus sativus var radicola* в лабораторных условиях при проращивании на фильтровальной бумаге. Оценивались энергия прорастания, всхожесть, длины корней и гипокотыля редиса, усреднённый и максимальный ростостимулирующий эффект (РСЭ).

Результаты. Все выделенные ЛК обладают значительным ростостимулирующим эффектом (РСЭ): отношение длины корней, выросших на седьмые-восьмые сутки под действием ЛК и в контроле имеет значение $РСЭ = 1,3-2,0$. Ростостимулирующий эффект возрастает в ряду $РСЭ(ЛК\ Осины) \ll РСЭ(ЛК\ Костры\ льна) \approx РСЭ(ЛК\ Соломы\ пшеницы) \approx РСЭ(ЛК\ Сосны)$. Ростостимулирующий эффект оптимальных концентраций ЛК частично маскируется ингибирующим эффектом их высоких концентраций.

Ключевые слова: лигнокислоты; ростостимуляторы; редис; солома пшеницы; костра льна; сосна; ванилин; целлюлоза

Для цитирования. Смирнова, М. А., Тарабанько, В. Е., Корсаков, А. В., Капаева, С. Н., Кайгородов, К. Л., & Бухряков, Н. С. (2027). Влияние лигнокислот, побочного продукта окислительной переработки растительного сырья в ванилин и целлюлозу, на проращивание семян редиса. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 19(1), 5001-5022. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2027-19-1-1807>

Influence of lignoacids, a by-product of oxidation of plant raw materials into vanillin and cellulose, on radish seed germination

**M.A. Smirnova, V.E. Tarabanko, A.V. Korsakov,
S.N. Капаева, K.L. Kaigorodov, N.S. Bukhryakov**

*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

Abstract

Background. Lignoacids (LA) are a by-products of the catalytic oxidation of plant raw materials into vanillin and cellulose. Their composition is similar humic acids, and they may possess plant growth-promoting activity. Therefore, study of the LA growth-promoting properties for agricultural crops is a relevant area.

The **purpose** is investigate the influence of the oxidation conditions of various plant raw materials and the radish germination conditions for the growth-promoting properties of the isolated LA.

Materials and methods. The growth-promoting activity of LAs isolated from various substrates was estimated using radish seeds (*Raphanus sativus* var. *radicula*) in the laboratory, with germination on filter paper. The germination energy, germination rate, radish root and hypocotyl lengths, and both the average and maximum growth-promoting effect (GPE) were estimated.

Results. All isolated LA has a significant GPE, the ratio of root lengths—comparing those grown under LA treatment versus control conditions on days 7–8—yielded a GPE value of 1.3–2.0. The GPE increased in the following order: $GPE(\text{aspen LA}) \ll GPE(\text{flax shive LA}) \approx GPE(\text{wheat straw LA}) \approx GPE(\text{Pine LA})$. The growth-promoting effect observed at optimal LA concentrations is partially masked by the inhibitory effect associated with high LA concentrations.

Keywords: lignoacids; growth stimulators; radish; wheat straw; flax shive; pine; vanillin, cellulose.

For citation. Smirnova, M. A., Tarabanko, V. E., Korsakov, A. V., Kapaeva, S. N., Kaigorodov, K. L., & Bukhryakov, N. S. (2027). Influence of lignoacids, a by-product of oxidation of plant raw materials into vanillin and cellulose, on radish seed germination. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 19(1), 5001-5022. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2027-19-1-1807>

Введение

В процессах каталитического окисления лигнина различного растительного сырья (древесина, травянистые растения, сельскохозяйственные отходы) образуются ванилин и целлюлоза. В качестве побочных продуктов таких процессов выступают лигнокислоты, фрагменты разрушающейся матрицы лигнина [28-29]. По своей структуре они могут быть схожи с гуминовыми веществами, для которых характерно ростостимулирующее действие [9; 19; 24]. Современный рынок предлагает большое количество гуминовых препаратов в виде гуматов, солей гуминовых кислот. Гуматы получают главным образом из ископаемых источников – торфа и различных видов углей и для ростостимулирования применяются их достаточно разбавленные растворы (0,001%).

В литературе описано большое количество сельскохозяйственных растений, при обработке которых растворами гуматов отмечается повышение урожайности. Например, для картофеля наблюдается рост урожайности на 30% [1; 13], для томатов – на 20% [11; 15], пшеницы – на 15% [9; 12], белокочанной капусты – на 10% [10]. Показаны и другие положительные эффекты влияния гуминовых веществ, например, накопление азота и фосфора в растениях. Так, опрыскивание листьев бобов (*Vicia faba*) растворами гуминовых кислот (1-3 г/л) дало прирост содержания фосфора и азота в бобах в полтора-два раза, с 3 до 4,5% и с 0,3 до 0,6% соответственно [22]. Высокие значения ростостимулирующих эффектов (РСЭ) гуминовых веществ, однако, встречаются довольно редко. Так, в обширном обзоре [26] средние значения ростостимулирующих эффектов в интервале 1,5-2,3 в области низких концентраций гуминовых веществ 5-10 мг/л представлены семью точками из 120: только 6% рассмотренных испытаний гуминовых веществ в проведенном мета-анализе имеют такие высокие значения РСЭ.

Гуминовые вещества отличаются сложной структурой и наличием различных типов функциональных групп (карбоксильные, метоксильные, гидроксильные и др.) [2, 14]. Тем не менее, механизм их ростостимулирующего действия остается до сих пор не выясненным. Предполагается, что гуминовые вещества обладают высокой гормональной активностью

[20-21; 24-25], и более активны низкомолекулярные фракции гуминовых веществ ($MM < 3500$ Да) [24]. Можно предположить, что лигнокислоты (ЛК) также будут обладать ростостимулирующей активностью, имея схожую структуру с гуминовыми веществами.

Гуминовые вещества получают экстракционной или окислительной обработкой торфа или углей [4-8; 27], тогда как ЛК можно выделить из щелочной реакционной массы, оставшейся после окисления возобновляемого растительного сырья или сельскохозяйственных отходов. Применение таких ЛК в качестве сельскохозяйственных ростостимуляторов позволит сократить количество сточных вод в процессах окисления и открывает возможность использования промышленных лигнинов [18].

Недавно нами изучено ростостимулирующее действие ЛК костры льна, обогащенного лигнином отхода производства льноволокна [16]. Такие лигнокислоты в невысоких концентрациях 5-150 мг/л повышают скорость роста корней и ростка редиса в 2-3 раза по сравнению с водой. 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%. В работе [17] изучена ростостимулирующая активность лигнокислот, полученных окислением костры льна, сосновой и осиновой древесины в ароматические альдегиды, ванилин и сиреневый альдегид. Показано, что ростостимулирующий эффект лигнокислот возрастает в ряду $ЛК_{\text{осины}} < ЛК_{\text{сосны}} < ЛК_{\text{костры льна}}$. Полученная закономерность интерпретирована различным содержанием метоксильных групп в фенилпропановых структурных единицах лигнинов изученных видов растительного сырья. Эта гипотеза открывает возможность поиска эффективных ростостимуляторов среди ЛК из травянистых растений.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния условий окисления растительного сырья различных видов и условий проращивания редиса на ростостимулирующие свойства лигнокислот, получаемых в качестве побочного продукта переработки растительного сырья в ванилин и целлюлозу.

Материалы и методы

В работе использовали следующие реактивы: гидрокарбонат калия, сульфат меди пятиводный, гидроксид натрия, соляную кислоту квалификации «хч», хлороформ. Лигнокислоты выделяли из проэкстрагированной реакционной массы после каталитического окисления опилок сосновой (*Pinus sylvestris* L.) древесины, а также измельченных костры льна (*Linum*

usitatissimum) и соломы пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Растительное сырьё было собрано в окрестностях г. Красноярск в 2023-2024 гг. Окисление субстратов проводили в автоклаве Nano-Mug Technologies (Индия) из нержавеющей стали емкостью 1 л, куда помещали 25 г опилок древесины, (фракция 1-2 мм), 500 мл 5% раствора NaOH и 37 г $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ для получения катализатора CuO. В реактор подавали кислород, поддерживая парциальное давление газа 2 атм. Процесс окисления проводился при варьируемой продолжительности и температуре окисления, скорость вращения пропеллерной мешалки составляла 1200 мин⁻¹. После завершения процесса окисления реактор охлаждали и после сброса давления проводили выгрузку реакционной массы. Ванилин извлекался из реакционной массы экстракцией эквивалентным количеством хлороформа, оставшуюся водную фазу отфильтровывали от твёрдого целлюлозного продукта.

ЛК осаждали из полученного водного раствора после фильтрования подкислением соляной кислотой до pH 2, промывали водой и высушивали на воздухе, выход ЛК составлял около 17-25% в расчете на лигнин. Некоторые характеристики аналогичных лигнокислот показаны в [17; 23]. Осадки ЛК (10 г/л) растворяли в растворах гидрокарбоната калия (10 г/л). Значения их pH составляли 8,26; 7,98; для ЛК, выделенных из соломы пшеницы и костры льна, 8,36; 7,75; 8,14; 7,59 – для ЛК, полученных из древесины сосны при 120 °C, 160 °C, 180 °C и 200 °C соответственно. Из них готовили поливочные растворы разбавлением до нужных концентраций.

Проращивание семян редиса *Raphanus sativus* var *radicula* сорта Жара под действием калиевых солей лигнокислот выполняли согласно [3]. Для редиса характерен малый срок прорастания (до 8 суток), поэтому он был выбран в качестве культуры для проращивания. Следует отметить, что в [16-17] проращивание проводили при 17-20 °C, а в настоящей работе при более высокой температуре 23-25 °C.

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 °C в течение 3-х суток, затем при 23-25 °C на свету до 8-ти суток. Воду в ходе эксперимента добавляли каждые сутки для восполнения потери массы образцов испарением. Оценивали энергию прорастания (доля нормально проросших семян на 4-е сутки), всхожесть (доля нормально проросших семян на 8-е сутки, [3]), а также измеряли длину корней и гипокотыла растений

(нижний участок стебля – от места перехода стебля в корень до первых зародышевых листьев). Для сравнения проводили аналогичное проращивание семян в дистиллированной воде.

Ростостимулирующий эффект (РСЭ) оценивали отношением длины корней или гипокотилей, проросших в растворах лигнокислот заданной концентрации и в воде (контроль) при заданной продолжительности прорастания по 10 семенам в каждом эксперименте:

$$РСЭ = \frac{l(ЛК)}{l(H_2O)} \quad (1)$$

где $l(ЛК)$ - длина корня или гипокотыля при проращивании в растворе ЛК, $l(H_2O)$ – длина корня или гипокотыля в воде.

Полученные средние значения, характеризующие РСЭ при заданных концентрациях и продолжительности прорастания, затем усредняли по концентрации ЛК в диапазоне 5-40 мг/л. Усредненные по концентрации ЛК значения далее усредняли по продолжительности проращивания. Обработку результатов проводили методом наименьших квадратов. Рассчитывали стандартное отклонение (ошибку единичного измерения) и ошибку среднего арифметического. При числе измерений $n=10$ ошибка среднего значения оказывается в три раза меньше ошибок измерения.

Результаты и обсуждение

Влияние лигнокислот на энергию прорастания и всхожесть семян редиса. Ранее нами в [16] была сформулирована гипотеза о необходимости поиска эффективных ростостимуляторов среди ЛК, получаемых из травянистых растений. Для развития этих работ нами в качестве ростостимуляторов использованы лигнокислоты, выделенные после окисления пшеничной соломы, костры льна и сосновой древесины при различных температурах. Следует отметить, что в [16-17] проращивание проводили температуре 17-20 °С, а в настоящей работе при 23-25 °С, и это различие условий дало определенные результаты. В табл. 1 представлены первичные результаты по влиянию изученных ростостимуляторов на усреднённую энергию прорастания и всхожесть семян редиса.

Для ЛК из пшеничной соломы характерно повышение энергии прорастания семян с 60 до 86%, а их всхожести – с 90 вплоть до 100%. Лигнокислоты, полученные окислением лигнина осиновой древесины на эти показатели почти не оказывают влияния. В целом влияние ЛК на энергию прорастания и всхожесть семян коррелируют между собой и возрастают в ряду

Таблица 1.

Влияние ЛК, выделенных при окислении сосновой древесины, пшеничной соломы и костры льна на усреднённые энергию прорастания (Е, четвертые сутки роста) и всхожесть (восьмые сутки) семян редиса

Table 1. Effect of lignoacids from pine wood, wheat straw, and flax shive on the average germination energy (E, fourth day of growth) and germination capacity (eighth day) of radish seeds

Состав раствора	Контрольные испытания		Результаты			Литературные данные [16]		
	H ₂ O дист	KHCO ₃ , 5-40 мг/л	ЛК соломы пшеницы, 5-40 мг/л	ЛК из костры льна, 5-40 мг/л	ЛК из со-сны, 5-40 мг/л	ЛК из костры льна, 5-40 мг/л	ЛК из со-сны, 5-40 мг/л	ЛК из осины, 5-40 мг/л
Е прорастания, %	60	60	86	78	73	97	79	60
Всхожесть семян, %	90	80	100	95	95	98	100	96

*ЛК*осины < *ЛК*сосны < *ЛК*соломы пшеницы < *ЛК*костры льна, расширяющим область результатов, полученных ранее [16-17].

Влияние ЛК из соломы пшеницы и костры льна на рост корней и гипокотили семян редиса. На рис. 1 представлены результаты проращивания редиса в растворах ЛК в сравнении с водой. Отчетливый ростостимулирующий эффект наблюдается в области концентраций ЛК 5-40 мг/л. Максимальные значения РСЭ (усреднение по десяти прорастающим семенам) наблюдаются в области концентраций лигнокислот, полученных из соломы пшеницы, 5-10 мг/л (1,88 и 1,74 для корня и гипокотили соответственно). Далее, при увеличении концентрации ЛК, РСЭ систематически снижается, но незначительно, на 15-20% относительных.

Аналогичное повышение концентрации (0-40 мг/л) ЛК, полученных окислением костры льна, дает прирост длины корней редиса до 30% (Рис. 2). Значительный ростостимулирующий эффект этих лигнокислот (РСЭ = 2,0) проявляется для гипокотили на седьмые-восьмые сутки роста.

Ежесуточные значения длины корней, гипокотили и РСЭ, а также их усредненные по концентрации ЛК (5-40 мг/л) и времени показатели приведены в Табл. 2. Также приведены максимальные значения ростостимулирующего эффекта, полученные на одной, оптимальной концентрации ЛК и продолжительности проращивания десяти семян. Усредненные показатели более значимы для планирования испытаний ЛК по выращиванию сельскохозяйственных растений в почве. Максимальные значения роста-

стимулирующего эффекта ЛК демонстрируют возможный потенциал этих стимуляторов.

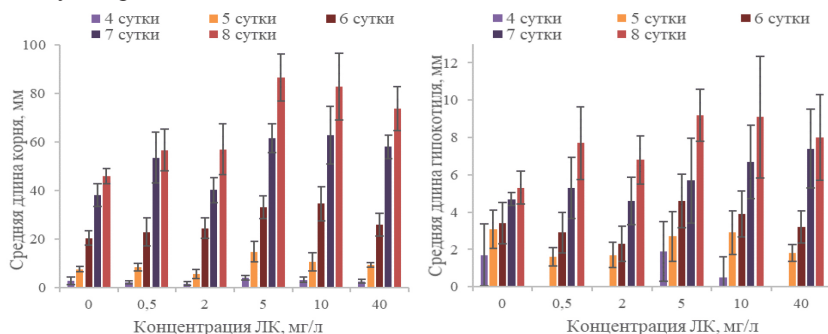


Рис. 1. Влияние концентрации ЛК, полученных из соломы пшеницы, и продолжительности прорастивания семян редиса на среднюю длину корней (слева) и гипокотыля (справа).

Fig.1. Effect of the oncentration of wheat straw-derived LA and the duration of radish seed germination on average length of roots (left) and hypocotyls (right).

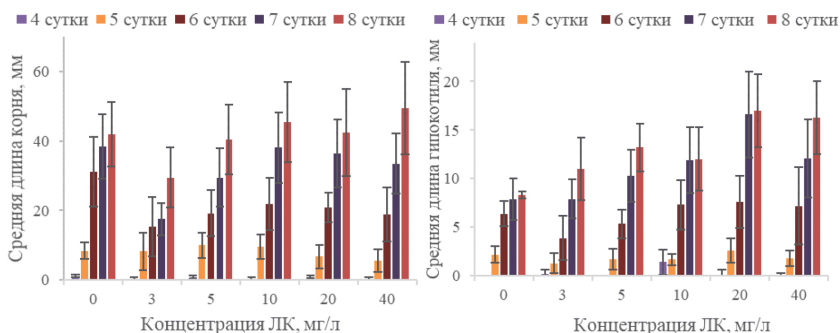


Рис. 2. Влияние концентрации ЛК, полученных из костры льна, и продолжительности прорастивания семян редиса на среднюю длину корней (слева) и гипокотыля (справа).

Fig. 2. Effect of the concentration of flax shive-derived LA and the duration of radish seed germination on average length of roots (left) and hypocotyls (right).

В одинаковых условиях прорастивания рост корней более эффективно стимулируется ЛК пшеницы ($PCЭ_{\text{средн}} = 1,5$, $PCЭ_{\text{макс}} = 1,9$) по сравнению с лигнокислотами костры ($PCЭ_{\text{средн}} = 1,2$, $PCЭ_{\text{макс}} = 1,5$). Различие эффективности этих ЛК по росту гипокотыля менее выражено, $PCЭ_{\text{макс}}$ варьируется в узких пределах 1,7-2,0. Отметим влияние температуры прорастивания (17-20 °C в [16-17]) и 23-25 °C по результатам Табл. 2. Повышение этой температуры

стимулирует рост гипокотилия лигнокислотами костры льна (от РСЭ_{макс} 1,6 до 2,0) и замедляет рост корня (от РСЭ_{макс} 5,7 до 1,5). Полученные результаты и их сравнение с литературными данными позволяют сделать следующие выводы. ЛК из костры льна и соломы пшеницы обладают высоким РСЭ, и увеличивают прирост длины корней и гипокотилия до двух-трех раз и более. При увеличении температуры прорастивания лигнокислоты из костры льна стимулируют рост гипокотилия сильнее по сравнению с ростом корня.

Таблица 2.

Стимулирование роста корней и гипокотилия редиса ЛК из пшеницы и костры льна. ЛК получены при 160 °С и продолжительности окисления 40 минут.

Table 2. Stimulation of the radish root and hypocotyl growth by LA from wheat and flax shive.

LA were obtained at 160 °C and 40 minutes.

	Концен-трация ЛК, мг/л	Длина корня и гипокотилия редиса, мм						РСЭ средний и максимальный*	S _{РСЭ}
		4 сут-ки	5 сут-ки	6 сут-ки	7 сут-ки	8 сут-ки			
ЛК из пшеницы									
Рост корня	0	2,9	7,7	20,5	38,1	45,9			
	5-40	3,37	11,7	31,33	60,8	80,97			
	РСЭ*	1,16	1,52	1,53	1,60	1,76	1,51	0,22	
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 5 мг/л						1,88		
Рост гипокотилия	0	1,7	3,1	3,4	4,7	5,3			
	5-40	0,8	2,47	3,9	6,6	8,77			
	РСЭ	0,47	0,80	1,15	1,40	1,65	1,10	0,47	
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 5 мг/л						1,74		
ЛК из костры									
Рост корня	0	1,05	8,4	31,1	38,5	42			
	5-40	1,6	11,8	22,6	38,3	48,8			
	РСЭ	1,52	1,41	0,73	0,99	1,16	1,16	0,32	
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 40 мг/л						1,48		
Рост гипокотилия	0	0	2,2	6,4	7,9				
	5-40	0,43	2,2	7,7	13,2				
	РСЭ	-	1	1,20	1,67		1,55	0,71	
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 20 мг/л						2,00		

*РСЭ средний - результат усреднения значений РСЭ_{средн} по продолжительности прорастивания (4-8 суток, 250 семян); максимальный РСЭ рассчитан по лучшей партии из десяти семян.

Влияние ЛК из сосновой древесины, на скорость роста корней и гипокотилий семян редиса. Отчетливый эффект ростостимулирования наблюдается для ЛК, полученных окислением древесины при 160 °С (рис. 3). Максимальные значения РСЭ наблюдаются в области концентраций лигнокислот 5-10 мг/л (1,6 и 2,0 для корня и гипокотилия соответственно). Далее, при увеличении концентрации ЛК, РСЭ систематически снижается вплоть до единицы. Лигнокислоты, полученные окислением древесины сосны при 180 °С, рост корней редиса практически не стимулируют (Рис. 4). Двукратный ростостимулирующий эффект наблюдается по росту гипокотилия при концентрации ЛК 5 мг/л и снижается до значения 1,7 с ростом концентрации ЛК до 40 мг/л.

Для ЛК, выделенных из сосны можно отметить также ингибирование роста корней в полтора раза относительно воды при концентрации ЛК 3 мг/л (Рис. 4 слева). Такие эффекты наблюдаются не всегда, но систематически (Рис. 3 слева, 4 справа), в том числе в [16] при концентрациях лигнокислот, полученных окислением сосновой древесины, 2-3 мг/л. Возможно, это связано с образованием адсорбционного монослоя лигнокислот на поверхности корней.

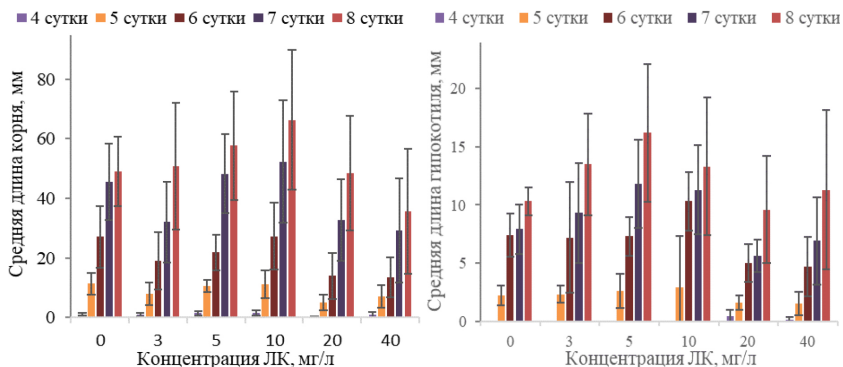


Рис. 3. Влияние концентрации ЛК, полученных окислением сосновой древесины при 160 °С, и продолжительности проращивания семян редиса на среднюю длину корней (слева) и гипокотилия (справа).

Fig. 3. Effect of the LA concentration from the pine wood at 160°C and the duration of radish seed germination on the average length of roots (left) and hypocotyls (right).

Количественные характеристики РСЭ лигнокислот, полученных окислением сосновой древесины, сведены в Табл. 3. Усреднённые по концентрациям ЛК, а затем по продолжительности прорастания значения РСЭ, рассчитанные по длине корня по каждому образцу лигнокислот, находят-

	Концентрация ЛК, мг/л	Длина корня и гипокотыля редиса, мм						
		4 сут. ки	5 сут. ки	6 сут. ки	7 сут. ки	8 сут. ки	РСЭ средний и максимальный	S _{РСЭ}
ЛК из сосны (прорастивание при 23-25 °С)								
ЛК-120-120, корень	0	1,05	8,4	31,1	38,5	42		
	5-40	0,76	10,2	28	39,1	55,6		
	РСЭ	0,72	1,22	0,9	1,02	1,32	1,04	0,24
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 10 мг/л						1,52	

ЛК-120-120, гипокотиль	0	0	2,2	6,4	7,9	8,3		
	5-40	0,6	2,2	6,9	12,8	16,3		
	РСЭ	-	1	1,08	1,61	1,96	1,13	0,75
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 5 мг/л						1,90	
ЛК-160-30, корень	0	1,05	8,4	31,1	38,5	42,0		
	5-40	0,99	8,4	29,1	40,7	52,0		
	РСЭ	0,94	1	0,94	1,06	1,24	1,04	0,13
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 10 мг/л						1,57	
ЛК-160-30, гипокотиль	0	0	2,2	6,4	7,9	8,3		
	5-40	0,13	2,1	6,8	8,9	12,6		
	РСЭ	-	0,96	1,07	1,13	1,52	0,93	0,56
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 5 мг/л						1,95	
ЛК-180-30, корень	0	1,05	8,4	31,1	38,5	42		
	5-40	1,35	10,8	25,7	35,9	39,7		
	РСЭ	1,29	1,29	0,83	0,93	0,95	1,06	0,22
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 5 мг/л						1,30	
ЛК-180-30, гипокотиль	0	0	2,2	6,4	7,9	8,3		
	5-40	0,18	2,5	7,4	11,7	15,4		
	РСЭ	-	1,15	1,15	1,48	1,86	1,12	0,70
	Максимальный РСЭ на восьмые сутки при концентрации ЛК 5 мг/л						1,70	

Аналогичные закономерности проявляются и при оценке РСЭ по длине гипокотеля. Усреднённые по концентрациям ЛК, а затем по продолжительности прорастания значения РСЭ для гипокотеля имеют близкие к единице значения, РСЭ = 1,04-1,12, а максимальные значения РСЭ = 1,7-1,9 почти не зависят от условий получения ЛК. Такие большие и достоверные различия усредненных и максимальных значений РСЭ легко объясняются ингибированием процессов роста большими по сравнению с оптимальными (5-10 мг/л) концентрациями лигнокислот. Как и в случае лигнокислот костры льна, высокая температура прорастивания стимулирует рост гипокотеля лигнокислотами более эффективно по сравнению с ростом корня. Отношение ростостимулирующих эффектов, вычисленных по длине гипокотеля и корня, при 17-20 °С меньше единицы [16-17], а при 23-25 °С больше единицы.

Рассмотрим влияние температуры проращивания (17-20 °С и 23-25 °С). Высокая температура ингибирует рост корней и гипокотили высокими концентрациями ЛК и по этой причине снижает значения средних РСЭ вплоть до единицы (Табл. 3, строки 1-6). При низкой температуре проращивания ингибирование ослабляется и средние значения РСЭ достоверно отличаются от нуля (РСЭ 1,3-1,4 [16]). При низких концентрациях ЛК ингибирование отсутствует и получаемые максимальные значения РСЭ имеют значения 1,5-2,0.

Максимальный ростостимулирующий эффект ЛК, полученных окислением пшеничной соломы (1,9 и 1,7 по росту корней и гипокотили соответственно), близок к эффективности ЛК из сосны (РСЭ_{макс} = 1,5-1,9). Ростостимулирующий эффект ЛК, полученных окислением костры льна (2,0-2,3 по росту корней), незначительно превышает аналогичный показатель лигнокислот из пшеницы (1,9). Ранее для ЛК из костры льна было получено вдвое большее значение РСЭ [17] (Табл. 2), но вариабельность таких показателей представляется вполне естественной.

Совокупность полученных результатов и опубликованных данных [16-17] по ростостимулированию лигнокислотами показывает, что лигнокислоты осины практически не активируют проращивание, а лигнокислоты костры льна, соломы пшеницы и сосновой древесины характеризуются близкими максимальными значениями РСЭ 1,5-2 при оптимальных концентрациях 5-10 мг/л:

$$PCЭ(ЛК\ Осины) << PCЭ(ЛК\ Костры\ льна) \approx PCЭ(ЛК\ Соломы\ пшеницы) \approx PCЭ(ЛК\ Сосны).$$

РСЭ оптимальных концентраций ЛК маскируется ингибирующим эффектом их высоких концентраций. Наиболее это заметно при повышении температуры проращивания на лигнокислотах сосновой древесины. Такое ингибирование может маскировать отмеченные ранее возможности существования связи между ростостимулирующей эффективностью лигнокислот и содержанием метоксильных групп в них [16-17].

Заключение

Изучено влияние условий окисления растительного сырья различных видов и условий проращивания редиса на РСЭ лигнокислот в лабораторных условиях. Полученные ЛК обладают высоким ростостимулирующим эффектом и увеличивают прирост длины корней и гипокотили до полутора-двух раз.

В изученных условиях проращивания (23-25 °С) максимальные эффекты, регистрируемые по росту корней, как правило, на восьмые сутки

проращивания при концентрации ЛК 5-10 мг/л, имеют значения 1,3-2,0. Аналогичные закономерности проявляются и при оценке РСЭ по длине гипокотыля, и максимальное значение РСЭ = 2,0 почти не зависит от условий получения ЛК. Средние значения РСЭ и для корня, и для гипокотыля имеют близкие к единице значения, РСЭ = 1,04-1,12. Такие большие и достоверные различия усредненных и максимальных значений РСЭ связаны с ингибированием процессов роста большими по сравнению с оптимальными (5-10 мг/л) концентрациями лигнокислот. Эти ингибирующие эффекты следует учитывать при изучении ростостимулирующих эффектов ЛК и их использовании.

Отметим влияние повышения температуры проращивания с 17-20 [16-17] до 23-25 °С на ростостимулирующий эффект лигнокислот из костры льна и древесины сосны. При низкой температуре корни растут быстрее гипокотыля, а при повышенной – наоборот, гипокотиль растет быстрее корня. При увеличении температуры проращивания эффекты ингибирования роста могут усиливаться.

Информация о конфликте интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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

Список литературы

1. Анохина, О. В., & Кадунов, А. А. (2018). Влияние гуминовых препаратов на урожайность картофеля. *Достижения науки и техники АПК*, 32(12), 34–35. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11209>. EDN: <https://elibrary.ru/YTBNKP>
2. Броварова, О. В., & Броварова, Д. А. (2023). Гуминовые вещества торфа. Свойства и биологическая активность. *Химия растительного сырья*, 2, 301–309. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211727>. EDN: <https://elibrary.ru/AMUBXY>
3. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.
4. Дудкин, Д. В. (2021). *Основы теории и технологии механохимической переработки древесных отходов и торфа в препараты гуминовой природы* [Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук]. СибГТУ. EDN: <https://elibrary.ru/HLAFUH>

5. Дудкин, Д. В., & Федяева, И. М. (2018). Малоотходная технология получения растворов гуминовых веществ из торфа различного ботанического состава и степени разложения. *Химия растительного сырья*, 2, 175–182. <https://doi.org/10.14258/jcprgm.2018023356>. EDN: <https://elibrary.ru/XQIGZF>
6. Ефанов, М. В., & Черненко, П. П. (2010). Получение азотсодержащих гуминовых препаратов из торфа. *Химия твёрдого топлива*, 1, 67–71. EDN: <https://elibrary.ru/KYNPGB>
7. Ефанов, М. В., Галочкин, А. И., & Черненко, П. П. (2008). Получение оксигуматов натрия из торфа. *Химия твердого топлива*, 2, 24–28. EDN: <https://elibrary.ru/ISCHSL>
8. Ефанов, М. В., Галочкин, А. И., Шотт, П. Р., Дудкин, Д. В., & Клепиков, А. Г. (2001). Азотсодержащее органоминеральное удобрение на основе древесных отходов. *Журнал прикладной химии*, 10, 1719–1721. EDN: <https://elibrary.ru/WNDRXB>
9. Кривошеев, С. И., & Шумаков, В. А. (2022). Использование ростостимулирующих биопрепаратов для предпосевной обработки семян в первичном семеноводстве озимой пшеницы. *Международный сельскохозяйственный журнал*, 6, 665–668. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_6654. EDN: <https://elibrary.ru/GTUPCE>
10. Малхасян, А. Б., Соловьёва, М. В., Петрова, О. Г., & Романов, П. В. (2022). Влияние гуминовых препаратов на формирование урожая и качество белокачанной капусты. *Молочнохозяйственный вестник*, 47(3), 104–119. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_104. EDN: <https://elibrary.ru/BRVFHV>
11. Назранов, Х. М., & Назранов, Б. Х. (2022). Влияние использования лигногумата на урожайность и качественные параметры томата в овощном севообороте. *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова*, 3(37), 18–25. <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-3-37-18-25>. EDN: <https://elibrary.ru/IDAFWC>
12. Пашкова, Г. И., & Кузьминых, А. Н. (2016). Роль гуматов в повышении урожайности зерна яровой пшеницы. *Вестник Марийского Государственного Университета*, 2(1), 48–50. EDN: <https://elibrary.ru/VZSEKL>
13. Полиенко, Е. А. (2011). Влияние гуминовых удобрений на урожайность картофеля. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 9, 48–49. EDN: <https://elibrary.ru/NYGJYX>
14. Попов, А. И. (2004). *Гуминовые вещества: свойства, строение, образование*. СПб.
15. Пронько, Н. А., Пронько, В. В., & Степанченко, Д. А. (2017). Влияние гуминовых препаратов на продуктивность томата на орошаемых каштановых почвах саратовского Заволжья. *Аграрный научный журнал. Естественные науки*, 9, 24–27.

16. Смирнова, М. А., Тарабанько, В. Е., Кайгородов, К. Л., Корсаков, А. В., Голубков, В. А., & Челбина, Ю. В. (2025). 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*, 4, 456–465. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250418019>. EDN: <https://elibrary.ru/MZYFVT>
17. Смирнова, М. А., Тарабанько, В. Е., Челбина, Ю. В., Кайгородов, К. Л., & Орешина, И. Д. (2024). Ростостимулирующая активность лигнокислот — побочного продукта окисления растительного сырья в ванилин и целлюлозу. *Химия растительного сырья*, 4, 427–437. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240415852>. EDN: <https://elibrary.ru/FOVVNW>
18. Чудаков, М. И. (1983). *Промышленное использование лигнина*. Лесная промышленность.
19. Berbara, R. L. L., & Garcia, A. C. (2014). Humic substances and plant defense metabolism. В Р. Ahmad & М. R. Wani (Ред.), *Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment* (pp. 297–319). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8591-9_11
20. Cacco, G., & Dell'Angola, G. (1984). Plant growth regulator activity of soluble humic complexes. *Canadian Journal of Soil Science*, 64, 225–228. <https://doi.org/10.4141/cjss84-023>
21. Dell'Angola, G., & Nardi, S. (1987). Hormone-like effect and enhanced nitrate uptake induced by depolycondensed humic fractions obtained from *Allolobophora rosea* and *A. caliginosa* faeces. *Biology and Fertility of Soils*, 4(3), 115–118. <https://doi.org/10.1007/BF00256983>. EDN: <https://elibrary.ru/UAHFJU>
22. El-Ghamry, A. M., Abd El-Hai, K. M., & Ghoneem, K. M. (2009). Amino and humic acids promote growth, yield and disease resistance of faba bean cultivated in clayey soil. *Australian Journal Basic and Applied Science*, 3(2), 731–739. EDN: <https://elibrary.ru/DBVALQ>
23. Golubkov, V. A., Tarabanko, V. E., Kaigorodov, K. L., Shestakov, S. L., Chelbina, Y. V., Smirnova, M. A., Popov, A. A., Skripnikov, Vigul, D. O., & Borovkova, V. S. (2023). Chemical processing of agricultural wastes into vanillin, pulp and glucose. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 137–145. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230413782>. EDN: <https://elibrary.ru/NJZGKI>
24. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1527–1536. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8). EDN: <https://elibrary.ru/BDAFAP>
25. Piccolo, A., Nardi, S., & Concheri, G. (1992). Structural characteristics of humic substances as related to nitrate uptake and growth regulation in plant systems.

- Soil Biology and Biochemistry*, 24(4), 373–380. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90197-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90197-6)
26. Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., & Cavagnaro, T. R. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. *Advances in Agronomy*, 124, 37–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>
27. Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. Wiley.
28. Tarabanko, V. E., & Tarabanko, N. (2017). Catalytic oxidation of lignins into the aromatic aldehydes: general process trends and development prospects. *International Journal of Molecular Sciences*, 18, 2421. <https://doi.org/10.3390/ijms18112421>. EDN: <https://elibrary.ru/XNNGSH>
29. Tarabanko, V. E., Kaygorodov, K. L., Kazachenko, A. S., Smirnova, M. A., Chelbina, Yu. V., Kosivtsov, Yu., & Golubkov, V. A. (2023). Mass transfer in the processes of native lignin oxidation into vanillin via oxygen. *Catalysts*, 13, 1490. <https://doi.org/10.3390/catal13121490>. EDN: <https://elibrary.ru/OKXUOA>

References

1. Anokhina, O. V., & Kadurov, A. A. (2018). The effect of humic preparations on potato yield. *Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex*, 32(12), 34–35. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11209>. EDN: <https://elibrary.ru/YTBHKB>
2. Brovarova, O. V., & Brovarova, D. A. (2023). Peat humic substances: Properties and biological activity. *Chemistry of Plant Raw Material*, 2, 301–309. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211727>. EDN: <https://elibrary.ru/AMUBXY>
3. GOST 12038-84. Seeds of agricultural crops. Methods for determination of germination.
4. Dudkin, D. V. (2021). *Fundamentals of the theory and technology of mechanochemical processing of wood waste and peat into humic preparations* [Doctoral dissertation abstract]. SibGTU. EDN: <https://elibrary.ru/HLAFUH>
5. Dudkin, D. V., & Fedyaeva, I. M. (2018). Low-waste technology for obtaining humic substance solutions from peat of different botanical composition and degree of decomposition. *Chemistry of Plant Raw Material*, 2, 175–182. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018023356>. EDN: <https://elibrary.ru/XQIGZF>
6. Efanov, M. V., & Chernenko, P. P. (2010). Obtaining nitrogen-containing humic preparations from peat. *Solid Fuel Chemistry*, 1, 67–71. EDN: <https://elibrary.ru/KYNPGB>
7. Efanov, M. V., Galochkin, A. I., & Chernenko, P. P. (2008). Obtaining sodium oxyhumates from peat. *Solid Fuel Chemistry*, 2, 24–28. EDN: <https://elibrary.ru/ISCHSL>

8. Efanov, M. V., Galochkin, A. I., Shott, P. R., Dudkin, D. V., & Klepikov, A. G. (2001). Nitrogen-containing organomineral fertilizer based on wood waste. *Journal of Applied Chemistry*, 10, 1719–1721. EDN: <https://elibrary.ru/WNDRXB>
9. Krivosheev, S. I., & Shumakov, V. A. (2022). The use of growth-stimulating bio-preparations for pre-sowing seed treatment in primary seed production of winter wheat. *International Agricultural Journal*, 6, 665–668. https://doi.org/10.55186/25876740_2022_65_6_6654. EDN: <https://elibrary.ru/GTUPCE>
10. Malkhasyan, A. B., Solovyova, M. V., Petrova, O. G., & Romanov, P. V. (2022). Effect of humic preparations on yield formation and quality of white cabbage. *Dairy Farming Bulletin*, 47(3), 104–119. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_104. EDN: <https://elibrary.ru/BRVFHV>
11. Nazranov, Kh. M., & Nazranov, B. Kh. (2022). Effect of lignohumate use on tomato yield and quality parameters in vegetable crop rotation. *Proceedings of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov*, 3(37), 18–25. <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-3-37-18-25>. EDN: <https://elibrary.ru/IDAFWC>
12. Pashkova, G. I., & Kuzminykh, A. N. (2016). The role of humates in increasing spring wheat grain yield. *Bulletin of the Mari State University*, 2(1), 48–50. EDN: <https://elibrary.ru/VZSEKL>
13. Polienko, E. A. (2011). Effect of humic fertilizers on potato yield. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 9, 48–49. EDN: <https://elibrary.ru/NYGJYX>
14. Popov, A. I. (2004). *Humic substances: Properties, structure, formation*. Saint Petersburg.
15. Pron'ko, N. A., Pron'ko, V. V., & Stepanchenko, D. A. (2017). Effect of humic preparations on tomato productivity on irrigated chestnut soils of the Saratov Trans-Volga region. *Agrarian Scientific Journal. Natural Sciences*, 9, 24–27.
16. Smirnova, M. A., Tarabanko, V. E., Kaigorodov, K. L., Korsakov, A. V., Golubkov, V. A., & Chelbina, Yu. V. (2025). Effect of lignic acids, a by-product of oxidative processing of pine and aspen wood into vanillin and cellulose, on germination of radish seeds (*Raphanus sativus* var. *radicula*). *Chemistry of Plant Raw Material*, 4, 456–465. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250418019>. EDN: <https://elibrary.ru/MZYFVT>
17. Smirnova, M. A., Tarabanko, V. E., Chelbina, Yu. V., Kaigorodov, K. L., & Oreshina, I. D. (2024). Growth-stimulating activity of lignic acids — a by-product of oxidation of plant raw material into vanillin and cellulose. *Chemistry of Plant Raw Material*, 4, 427–437. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240415852>. EDN: <https://elibrary.ru/FOVVNW>
18. Chudakov, M. I. (1983). *Industrial use of lignin*. Lesnaya Promyshlennost.
19. Berbara, R. L. L., & Garcia, A. C. (2014). Humic substances and plant defense me-

- tabolism. B. P. Ahmad & M. R. Wani (Ред.), *Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment* (pp. 297–319). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8591-9_11
20. Cacco, G., & Dell'Angola, G. (1984). Plant growth regulator activity of soluble humic complexes. *Canadian Journal of Soil Science*, 64, 225–228. <https://doi.org/10.4141/cjss84-023>
21. Dell'Angola, G., & Nardi, S. (1987). Hormone-like effect and enhanced nitrate uptake induced by depolycondensed humic fractions obtained from *Allolobophora rosea* and *A. caliginosa* faeces. *Biology and Fertility of Soils*, 4(3), 115–118. <https://doi.org/10.1007/BF00256983>. EDN: <https://elibrary.ru/UAHFJU>
22. El-Ghamry, A. M., Abd El-Hai, K. M., & Ghoneem, K. M. (2009). Amino and humic acids promote growth, yield and disease resistance of faba bean cultivated in clayey soil. *Australian Journal Basic and Applied Science*, 3(2), 731–739. EDN: <https://elibrary.ru/DBVALQ>
23. Golubkov, V. A., Tarabanko, V. E., Kaigorodov, K. L., Shestakov, S. L., Chelbina, Y. V., Smirnova, M. A., Popov, A. A., Skripnikov, Vigul, D. O., & Borovkova, V. S. (2023). Chemical processing of agricultural wastes into vanillin, pulp and glucose. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 137–145. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230413782>. EDN: <https://elibrary.ru/NJZGKI>
24. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., & Vianello, A. (2002). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 1527–1536. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8). EDN: <https://elibrary.ru/BDAFAP>
25. Piccolo, A., Nardi, S., & Concheri, G. (1992). Structural characteristics of humic substances as related to nitrate uptake and growth regulation in plant systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(4), 373–380. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90197-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90197-6)
26. Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., & Cavagnaro, T. R. (2014). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. *Advances in Agronomy*, 124, 37–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>
27. Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. Wiley.
28. Tarabanko, V. E., & Tarabanko, N. (2017). Catalytic oxidation of lignins into the aromatic aldehydes: general process trends and development prospects. *International Journal of Molecular Sciences*, 18, 2421. <https://doi.org/10.3390/ijms18112421>. EDN: <https://elibrary.ru/XNNGSH>
29. Tarabanko, V. E., Kaygorodov, K. L., Kazachenko, A. S., Smirnova, M. A., Chelbina, Yu. V., Kosivtsov, Yu., & Golubkov, V. A. (2023). Mass transfer in the processes

of native lignin oxidation into vanillin via oxygen. *Catalysts*, 13, 1490. <https://doi.org/10.3390/catal13121490>. EDN: <https://elibrary.ru/OKXUOA>

ВКЛАД АВТОРОВ

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Смирнова Марина Александровна, к.х.н., научный сотрудник

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50, стр. 24, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
smirnova.ma@icct.krasn.ru*

Тарабанько Валерий Евгеньевич, д.х.н., главный научный сотрудник

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50, стр. 24, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
veta@icct.ru*

Корсаков Артём Васильевич, младший научный сотрудник

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50, стр. 24, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
art.korsakoff@yandex.ru*

Капаева Светлана Николаевна, младший научный сотрудник

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50, стр. 24, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
kapueva.sn@icct.krasn.ru*

Кайгородов Константин Леонидович, младший научный сотрудник

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50, стр. 24, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
kulik@icct.ru*

Бухряков Никита Сергеевич, лаборант

*Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Академгородок, 50, стр. 24, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация
bunikserg@gmail.com*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Marina A. Smirnova, PhD, researcher

*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences
50, Bldg. 24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
smirnova.ma@icct.krasn.ru
SPIN-code: 9010-6019
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6506-3449>
Scopus Author ID: 57200554061*

Valery E. Tarabanko, DSc, chief researcher

*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
50, Bldg. 24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
veta@icct.ru
SPIN-code: 4933-8383
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0501-3818>
Scopus Author ID: 7801675176*

Artem V. Korsakov, junior researcher

*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
50, Bldg. 24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
art.korsakoff@yandex.ru
SPIN-code: 1154-8555
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4912-3681>*

Svetlana N. Kapaeva, junior researcher

*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences*

50, Bldg. 24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

kapaeva.sn@icct.krasn.ru

SPIN-code: 1387-6486

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0607-4911>

Konstantin L. Kaygorodov, junior researcher

*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences*

50, Bldg. 24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

kulik@icct.ru

SPIN-code: 4112-3972

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3156-3749>

Scopus Author ID: 56801896100

Nikita S. Bukhryakov, laboratory assistant

*Institute of Chemistry and Chemical Technology, Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences*

50, Bldg. 24, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

bunikserg@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4930-9507>

Поступила 20.09.2025

После рецензирования 20.10.2026

Принята 22.10.2026

Received 20.09.2025

Revised 20.10.2026

Accepted 22.10.2026