

Научная статья

УДК 537.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19303>

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВАНИЛИНОВОЙ КИСЛОТЫ

С. С. Хвиюзов¹ , А. С. Волков²

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН, г. Архангельск, Россия;

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

 khviyuzov.s@yandex.ru

Аннотация. Методом импедансной спектроскопии определены значения удельной электропроводности (УЭ) ванилиновой кислоты в диапазонах частот 10 мГц – 10 МГц и температур 153 – 433 К. Показан степенной характер частотных зависимостей УЭ исследуемого объекта. На основе уравнения Йоншера выделены высоко-, средне- и низкочастотные составляющие указанных зависимостей, которые соотнесены с функциональными группами в структуре ванилиновой кислоты, участвующими в переносе зарядов. Проводимость в области низких частот связана с карбоксильными и метоксильными группами, средних – с фенольными гидроксильными группами, участвующими в переносе заряда. В высокочастотной области носителями заряда являются π -электроны бензольного кольца молекулы. На основе уравнения Аррениуса были найдены значения энергии активации проводимости. В итоге доказан прыжковый механизм электропроводности в выбранном температурном интервале.

Ключевые слова: ванилиновая кислота, удельная электропроводность, уравнение Йоншера, уравнение Аррениуса, прыжковая проводимость

Финансирование: Исследования проведены в рамках Государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН 2025–2027 гг. № 125021902595-1.

Для цитирования: Хвиюзов С. С., Волков А. С. Анализ температурно-частотных зависимостей удельной электропроводности ванилиновой кислоты // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 3. С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19303>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19303>

AN ANALYSIS OF TEMPERATURE-FREQUENCY DEPENDENCES OF SPECIFIC CONDUCTIVITY OF VANILLIC ACID

S. S. Khviyuzov¹ , A. S. Volkov²

¹ N. P. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of RAS, Arkhangelsk, Russia;

² Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
 khviyuzov.s@yandex.ru

Abstract. The values of specific electrical conductivity (SEC) of vanillic acid samples have been measured in the frequency range from 10 mHz to 10 MHz, over a temperature range between 153 and 433 K, using impedance spectroscopy. The frequency dependence of the object's SEC was shown to obey a power law. Based on the Jonscher equation, three frequency components of the SEC were identified. They were correlated with functional groups involved

in charge transfer in the molecule. The conductivity in the low-frequency region was associated with carboxyl and methoxyl groups, and it was with phenolic hydroxyl groups involved in charge transfer in the medium frequency region. The π electrons of the benzene ring of the molecule were charge carriers in the high-frequency region. Based on the Arrhenius equation, the values of the activation energy of conductivity were found. As a result, the hopping mechanism of electrical conductivity in the selected temperature range was proven.

Keywords: vanillic acid, specific conductivity, Jonscher equation, Arrhenius equation, hopping conductivity

Funding: This reported study was carried out within the framework of the State Assignment to N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, (No. 125021902595-1, years 2025–2027).

For citation: Khviyuzov S. S., Volkov A. S., An analysis of temperature-frequency dependences of specific conductivity of vanillic acid, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (3) (2026) 27–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19303>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Ароматические соединения находят широкое применение в электротехнике в качестве полупроводников и диэлектриков в светоизлучающих устройствах и сенсорах, поэтому их исследования представляют значительный практический интерес. Важное направление работ по этой тематике – синтез полиароматических соединений с различными донорно-акцепторными заместителями [1]. При этом ароматические соединения могут быть получены из лигнина, содержащегося в растениях (его концентрация достигает в них 35%). Одним из путей переработки лигнинов является получение низкомолекулярных соединений, в том числе ванилиновой кислоты.

Указанная кислота используется в пищевой и фармацевтической промышленности, в органическом синтезе при получении полимеров и низкомолекулярных фенолов. Производство ванилиновой кислоты осуществляется методом химического синтеза, где в качестве исходных продуктов используется гваякол, изоэвгенол и лигнин [2].

Лигнин и низкомолекулярные фенольные соединения относятся к диэлектрикам, в которых основным механизмом движения зарядов является активационный или «прыжковый» [3]. В зависимости от физической природы носителей заряда электропроводность диэлектриков бывает электронной, поляронной и ионной. Среди механизмов переноса заряда выделяют дрейфовый, прыжковый и диффузионный. Заряженные частицы под воздействием электрического поля могут ограниченно перемещаться в диэлектрике по степенному закону Йоншера для удельной электропроводности σ , который имеет вид

$$\sigma \sim f^n, \text{ где } 0,7 < n < 1,0,$$

причем показатель степени n зависит от температуры ввиду взаимосвязи времени релаксации и частоты f [4]. Использование степенного закона Йоншера позволяет выделять различные механизмы прыжковой проводимости [5, 6].

Другими словами, сложный вид частотных зависимостей удельной электропроводности диэлектриков обусловлен наличием нескольких механизмов проводимости с участием различных структурных групп, вовлеченных в процесс переноса заряда. Анализ функций $\sigma(f)$ для смесей сложного состава возможен на основе степенных зависимостей вида $\sigma \sim f^n$. Для соединений сложного химического состава необходимо устанавливать влияние функциональной природы.

Цель данной работы – анализ частотных зависимостей удельной электропроводности ванилиновой кислоты как полифункционального соединения.

В связи с указанной целью были поставлены задачи выявления отдельных частотных составляющих удельной электропроводности и оценки энергии активации проводимости функциональных групп, участвующих в переносе заряда.

Материалы и методы

Коммерческий продукт ванилиновая (4-гидрокси-3-метоксибензойная) кислота $C_8H_8O_4$ (более 97%, Fluka, Германия) представляет собой кристаллический мелкодисперсный порошок с температурами плавления и кипения 483 и 626 К, соответственно. Дипольный момент молекулы составляет (в зависимости от конформационного состояния) от 1,50 до 4,05 Д [7].

Перед проведением измерений воздушно-сухую навеску порошкообразного образца высушивали при температуре 298 К и давлении 10 мм рт. ст. в течение 24 ч над силикагелем в вакуумном сушильном шкафу (Миус, Россия) до остаточной влажности не более 1 %.

Электрические характеристики были определены с помощью широкополосного диэлектрического спектрометра BDS Novocontrol Concept 80 (Германия) в диапазоне частот переменного электрического поля 10 мГц – 10 МГц и в температурном интервале (153 – 453) К с шагом 20 К.

Термостатирование осуществлялось в парах жидкого азота с помощью криосистемы Novocontrol Quatro. Для измерений использовали альфа-анализатор и активную ячейку ZGS 1200. Порошок массой 2,0 г помещали в круглую ячейку (плоский конденсатор диаметром 2,2 см с расстоянием между электродами 4,5 мм). Герметичность ячейки обеспечивалась цилиндрической полый тефлоновой прокладкой, электрическая проводимость которой много меньше таковой для образца (под образцом здесь подразумевается цилиндрический объем порошка в форме таблетки).

Действительная часть удельной электрической проводимости образца рассчитывалась с учетом геометрических параметров измерительной ячейки и проводимости тефлоновой прокладки σ_f с помощью программного обеспечения диэлектрического спектрометра WinData:

$$\sigma = G S d^{-1} - \sigma_f, \quad (1)$$

где G , См, – электрическая проводимость образца; S , м², – площадь оснований цилиндрического объема образца; d , м, – его толщина.

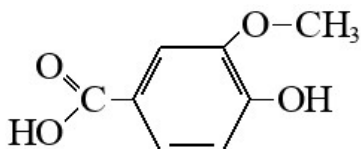


Рис. 1. Структурная формула ванилиновой кислоты

Ванилиновая кислота содержит характерные для лигнинов функциональные группы, сопряженные с бензольным кольцом: карбоксильную –COOH, фенольную гидроксильную –OH и метоксильную –OCH₃ группы (рис. 1). Молекула имеет два кислотных полярных центра. Как материал ванилиновая кислота проявляет свойства полярного диэлектрика.

Результаты и их обсуждение

Стоит начать с более подробного описания физико-химических свойств исследуемого материала. Значение показателя кислотности pK_a (K_a – константа кислотной диссоциации) в водной среде фенольной гидроксильной группы составляет 9,5 ед., карбоксильной – 4,5 ед. [8]. В результате суммарного действия индуктивного и мезомерного (I - и M -) электронных эффектов заместителей, электронная плотность на бензольном кольце в молекуле ванилиновой кислоты оказывается наименьшей среди мономерных фенолов, моделирующих структурное звено хвойного лигнина. Индуктивный I -эффект вызван смещением электронной плотности по цепи σ -связей в молекуле за счет разницы электроотрицательностей атомов или групп атомов; мезомерный M -эффект вызван перераспределением электронной плотности в сопряженных системах через π -связи. Карбоксильная группа за счет отрицательных индуктивного (–0,50 относительно атома водорода) и мезомерного (–0,20) эффектов проявляет электроноакцепторные свойства и снижает электронную плотность в бензольном кольце. Фенольная гидроксильная (–OH) и метоксильная (–OCH₃) группы за счет $-I$ -эффекта (–0,50 и –0,45) и большего $+M$ -эффекта (+0,68 и +0,52), соответственно, обладают электронодонорными свойствами и повышают электронную плотность на бензольном кольце [9].

Различия в дипольных моментах приводят к дисперсии поляризации в переменных электрических полях. Исследования с использованием широкого частотного диапазона позволяют оценивать эффекты, обусловленные поляризацией диполей, атомов и электронов. Выбранный температурный диапазон 153 – 453 К соответствует твердому агрегатному состоянию исследуемой ванилиновой кислоты. Данные термогравиметрического анализа показывают ее устойчивость при температуре T ниже 473 К, потеря массы не превышает 5 % вследствие удаления химически связанной воды [10].

Полученные нами частотно-температурные зависимости удельной электропроводности σ ванилиновой кислоты представлены на рис. 2.

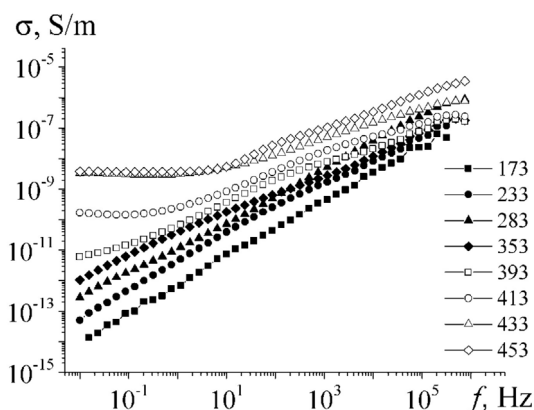


Рис. 2. Частотно-температурные зависимости удельной электропроводности ванилиновой кислоты; f – частота переменного электрического поля; числа в легенде указывают значения температуры (в К)

Зависимость $\sigma(f)$ характеризуется степенной функцией, причем в разных частотных диапазонах ее можно описать собственной степенной функцией на основе уравнения Йоншера $\sigma \sim f^n$:

$$\sigma(f) = \begin{cases} \sigma_{DC}, f \rightarrow 0, \\ Af^\alpha, f \in [10^{-2}; 10] \text{ Hz}, \\ Bf^\beta, f \in [10; 10^3] \text{ Hz}, \\ Cf^\gamma, f \in [10^3; 10^7] \text{ Hz}, \end{cases} \quad (2)$$

где σ_{DC} , См/м, – удельная электропроводность на постоянном токе; α , β , γ – показатели степени, зависящие от температуры и характеризующие свойства функциональных групп, участвующих в переносе заряда по веществу; параметры A , B и C характеризуют интенсивность поляризации.

Вообще говоря, уравнение (2) принято формулировать через частоту $\omega = 2\pi f$, но в данном случае целесообразны формулы с частотой f . Сложный вид уравнения (2) свидетельствует о наличии различных механизмов проводимости или разных групп, участвующих в переносе заряда для соответствующих частотных диапазонов.

Значения величины σ_{DC} определяли через аппроксимацию зависимости $\sigma(f)$ при $f \rightarrow 0$; это оказалось возможным только при температурах свыше 413 К. Ниже этого значения, в низкочастотной области наблюдается выраженная зависимость $\sigma(f)$, что приводит к высоким погрешностям при определении σ_{DC} . Например, при $T = 413$ К значение σ_{DC} составляло $1,5 \cdot 10^{-10}$ См/м, а при $T = 433$ и 453 К было $\sigma_{DC} = 3,4 \cdot 10^{-9}$ См/м. Для сравнения целесообразно привести значение σ_{DC} для фенолформальдегидной смолы: $\sigma_{DC} = 2,3 \cdot 10^{-10}$ См/м при $T = 298$ К [11].

На основе анализа первой (σ') и второй (σ'') производных для температурного интервала от 233 до 393 К, на зависимостях $\sigma(f)$ нами было выделено три частотных диапазона: низко-, средне- и высокочастотный, которые охарактеризованы параметрами, входящими в формулы (2). Затем по данным частотно-температурных зависимостей мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon''(f)$ для лигнина и соединений, моделирующих его структурные звенья, было выделено три релаксационных процесса с участием функциональных групп и π -электронов бензольного кольца [12 – 15].

Из сопоставления этих данных следует, что параметры низкочастотной проводимости A и α отражают участие в переносе зарядов карбоксильной ($-\text{COOH}$) и метоксильной ($-\text{OCH}_3$) группами. В среднечастотной области, характеризуемой параметрами B и β , участвуют фенольные гидроксильные ($-\text{OH}$) группы ванилиновой кислоты, а также водородные связи ее молекулы. К гидроксильным группам также следует отнести остаточное содержание химически связанной воды, где проявляются L - и D -ориентационные структурные, а также ионные дефекты H_3O^+ и OH^- . Наличие L - и D -дефектов вызвано взаимным расположением связей $\text{O}-\text{H}$ в структуре льда: для L -типа характерно отсутствие атомов водорода между соседними атомами кислорода ($-\text{O}-\text{O}-$), для D -дефекта –



взаимное расположение связей О—Н Н—О с отсутствием кислорода между атомами водорода. Точечные ионные дефекты, образованные ионами H_3O^+ и OH^- , возникают при ионизации молекул воды и обеспечивают протонную проводимость. В высокочастотной области (с параметрами C и γ), в качестве носителей заряда участвуют π -электроны бензольного кольца. Значения коэффициентов уравнения (2) были найдены по кривым зависимостей $\sigma(f)$, аппроксимированных степенной функцией вида

$$\sigma = \sigma_0 f^n, \quad (3)$$

где σ_0 имеет смысл параметров A , B , C (См/м), а показатель степени n — параметров α , β , γ в соответствующих частотных диапазонах (рис. 3).

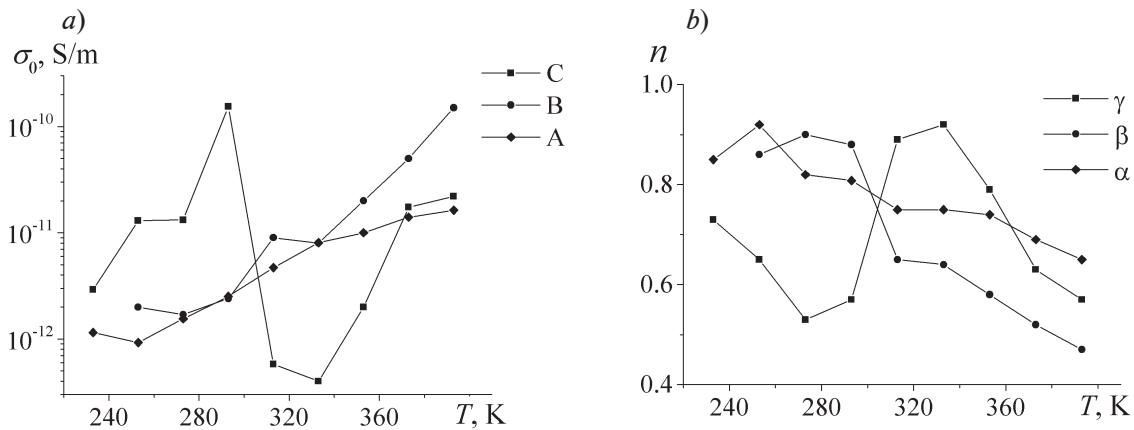


Рис. 3. Температурные зависимости параметров σ_0 (a) и n (b) уравнения (3) в трех частотных диапазонах, характеризующихся параметрами (A , α), (B , β) и (C , γ) на основе уравнения Йоншера

Монотонное, близкое к линейному, изменение коэффициентов степенной функции (2) наблюдается только для низко- и среднечастотной областей. С учетом выполняемости закона Аррениуса, энергия активации проводимости для низко- и среднечастотной областей составила 0,18 и 0,51 эВ, соответственно. Значения показателей степени n от 0,47 до 0,92 свидетельствуют о прыжковом механизме проводимости во всем исследуемом диапазоне частот.

Зависимости величины σ от обратной температуры (T^{-1}) на различных частотах переменного электрического поля представлены на рис. 4, а. Видно, что в диапазоне частот 1,15 кГц – 1,15 МГц и температурном интервале 213 – 333 К наблюдается экстремум вблизи значения 293 К, обусловленный структурным переходом, совершаемым ввиду изменения сетки слабых внутримолекулярных водородных связей с энергией около 7 кДж/моль; водородные связи образуются с участием функциональных групп молекулы. При этом высокоэнергетические межмолекулярные водородные связи (до 60 кДж/моль) между карбоксильными группами различных молекул, обеспечивающих кристаллическую структуру вещества, не претерпевают разрушения [7, 16, 17].

Область температурного экстремума при $T = 293$ К была разбита на две области, которые удалось удовлетворительно описать уравнением Аррениуса:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-E_a/kT), \text{ или } \ln \sigma = \ln \sigma_0 - E_a/kT, \quad (4)$$

где E_a , эВ, — энергия активации проводимости.

Для высоко- и низкотемпературной областей полученные значения E_a в зависимости от частоты внешнего электрического поля приведены на рис. 4, б.

При снижении частоты от 1 МГц до 0,1 мГц и при температуре T выше 293 К значения E_a линейно возрастают от 0,55 до 1,00 эВ, а при температуре T ниже 293 К значения E_a претерпевают рост от 0,40 до 0,60 эВ с максимумом при 0,55 эВ. Важно отметить, что значения энергии активации ниже 1 эВ характерны для прыжкового механизма проводимости диэлектрика.

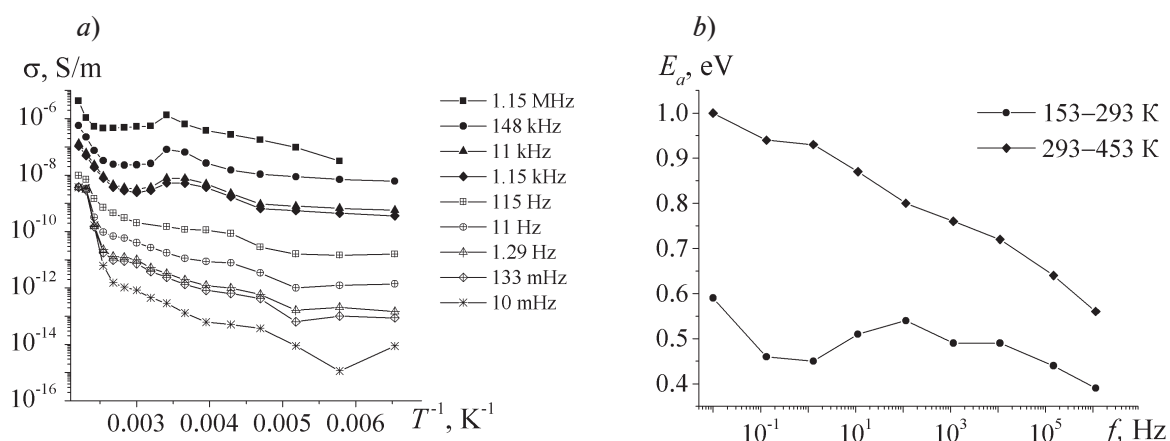


Рис. 4. Зависимости удельной электропроводности от обратной температуры на различных частотах внешнего электрического поля (a) и энергии активации проводимости от частоты для двух температурных интервалов (b)

Заключение

Методом импедансной спектроскопии получены частотно-температурные зависимости удельной электрической проводимости ванилиновой кислоты в диапазонах частот 10 мГц – 10 МГц и температур 153 – 433 К. Выявлено наличие трех частотных диапазонов удельной электропроводности, охарактеризованных степенными функциями на основе уравнения Йоншера. Проводимость порошкообразной ванилиновой кислоты обеспечивается разными функциональными группами ее молекул, участвующими в переносе заряда: в области низких частот это карбоксильные и метоксильные группы, средних частот – это гидроксильные группы. В высокочастотной области носителями заряда являются π -электроны бензольного кольца молекулы. Результаты оценки энергии активации проводимости групп, участвующих в переносе заряда, указывают на прыжковый механизм проводимости ванилиновой кислоты в изученных частотном и температурном диапазонах.

Полученные в работе результаты рекомендуется использовать при оценке изменения электропроводящих свойств низкомолекулярных ароматических соединений (а также лигнинного полимера) в процессе их окисления, поскольку структурные звенья макромолекул соединены труднополяризуемыми (C–C)-связями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu Z., He J., Yang H., Yang S. Progress in aromatic polyimide films for electronic applications: Preparation, structure and properties // *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 6. P. 1269.
2. Dandekar P., Wasewar K. L. Experimental investigation on extractive separation of vanillic acid // *Chemical Data Collections*. 2020. Vol. 30. December. P. 100564.
3. Khviyuzov S. S., Volkov A. S. Influence of ionic impurities on the dielectric properties of lignin // *Polymers for Advanced Technologies*. 2024. Vol. 35. No. 6. P. e6467.
4. Jonscher A. K. Dielectric relaxation in solids // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1999. Vol. 32. No. 14. Pp. 57–70.
5. Jena S. K., Joshi D. C., Ghosh S., Dasari K., Thota S. Dynamical response of localized electron hopping and dipole relaxation in $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ magnetoceramics // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021. Vol. 54. No. 42. P. 425303.
6. Maruthi R., Deshpande S. K., Deshmukh V., Singh K., Thota S. Correlated barrier charge hopping and non-Debye relaxation in columbite MnNb_2O_6 // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2023. Vol. 56. No. 2. P. 025501.
7. de Oliveira T. S., Ghosh A., Chaudhuri P. Exploring the hydrogen-bonded interactions of vanillic acid with atmospheric bases: a DFT study // *Structural Chemistry*. 2024. Vol. 35. No. 5. Pp. 1601–1611.

8. Ragnar M., Lindgren C. T., Nilvebrant N. O. pK_a values of guaiacyl and syringyl phenols related to lignin // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2000. Vol. 20. No. 3. Pp. 277–305.
9. Беккер Г. О. Введение в электронную теорию органических реакций. Пер. с нем. М.: Мир, 1977. 658 с.
10. Sazanov Yu. N., Goykhman M. Ya., Podeshvo I. V., Fedorova G. N., Mikhailov G. M., Kudriavtsev V. V. Thermochemistry of polymers based on vanillic acid // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 1999. Vol. 55. No. 3. Pp. 721–726.
11. Li Y-C., Lee S-Y., Wang H., Jin F-L., Park S-J. Enhanced electrical properties and impact strength of phenolic formaldehyde resin using silanized graphene and ionic liquid // ACS Omega. 2024. Vol. 9. No. 1. Pp. 294–303.
12. Боголицын К. Г., Хвиюзов С. С., Волков А. С., Копосов Г. Д., Гусакова М. А. Широкополосная диэлектрическая спектроскопия лигнина // Журнал физической химии. 2019. Т. 93. № 2. С. 307–312.
13. Kaminska E., Kaminski K., Paluch M., Ngai K. L. Primary and secondary relaxations in supercooled eugenol and isoeugenol at ambient and elevated pressures: Dependence on chemical microstructure // The Journal of Chemical Physics. 2006. Vol. 124. No. 16. P. 164511.
14. Volkov A. S., Kuposov G. D., Khviyuzov S. S. Features of the temperature-frequency dependences of the electrophysical properties of vanillin alcohol as a model lignin compound // Chemical Physics. 2021. Vol. 548. 1 August. P. 111202.
15. Волков А. С., Хвиюзов С. С. Анализ температурно-частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и удельной проводимости ванилина // Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 133. № 2. С. 134–140.
16. Cocinero E. J., Lesarri A., Écija P., Basterretxea F., Fernández J. A., Castaño F. Competing hydrogen bonding in methoxyphenols: The rotational spectrum of *o*-vanillin // Journal of Molecular Spectroscopy. 2011. Vol. 267. No. 1–2. Pp. 112–117.
17. Beni A. S., Chermahini A. N., Sharghi H. Theoretical studies of hydrogen bond interactions in 4-substituted benzoic acids dimers // Journal of the Korean Chemical Society. 2011. Vol. 55. No. 3. Pp. 392–399.

REFERENCES

1. Wu Z., He J., Yang H., Yang S., Progress in aromatic polyimide films for electronic applications: Preparation, structure and properties, Polymers. 14 (6) (2022) 1269.
2. Dandekar P., Wasewar K. L., Experimental investigation on extractive separation of vanillic acid, Chem. Data Collect. 30 (Dec) (2020) 100564.
3. Khviyuzov S. S., Volkov A. S., Influence of ionic impurities on the dielectric properties of lignin, Polym. Adv. Technol. 35 (6) (2024) e6467.
4. Jonscher A. K., Dielectric relaxation in solids, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (14) (1999) 57–70.
5. Jena S. K., Joshi D. C., Ghosh S., et al., Dynamical response of localized electron hopping and dipole relaxation in $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ magnetoceramics, J. Phys. D: Appl. Phys. 54 (42) (2021) 425303.
6. Maruthi R., Deshpande S. K., Deshmukh V., et al., Correlated barrier charge hopping and non-Debye relaxation in columbite MnNb_2O_6 , J. Phys. D: Appl. Phys. 56 (2) (2023) 025501.
7. de Oliveira T. S., Ghosh A., Chaudhuri P., Exploring the hydrogen-bonded interactions of vanillic acid with atmospheric bases: a DFT study, Struct. Chem. 35 (5) (2024) 1601–1611.
8. Ragnar M., Lindgren C. T., Nilvebrant N. O., pK_a values of guaiacyl and syringyl phenols related to lignin, J. Wood Chem. Technol. 20 (3) (2000) 277–305.
9. Bekker H., Einführung in die Elektronentheorie Organisch-Chemischer Reaktionen [Introduction to the electronic theory of organic reactions], VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, Germany, 1964.
10. Sazanov Yu. N., Goykhman M. Ya., Podeshvo I. V., et al., Thermochemistry of polymers based on vanillic acid, J. Therm. Anal. Calorim. 55 (3) (1999) 721–726.
11. Li Y-C., Lee S-Y., Wang H., et al., Enhanced electrical properties and impact strength of phenolic formaldehyde resin using silanized graphene and ionic liquid, ACS Omega. 9 (1) (2024) 294–303.
12. Bogolitsyn K. G., Khviyuzov S. S., Volkov A. S., et al., Broadband dielectric spectroscopy of lignin, Russ. J. Phys. Chem. A. 93 (2) (2019) 353–358.

13. Kaminska E., Kaminski K., Paluch M., Ngai K. L., Primary and secondary relaxations in supercooled eugenol and isoeugenol at ambient and elevated pressures: Dependence on chemical microstructure, *J. Chem. Phys.* 124 (16) (2006) 164511.
14. Volkov A. S., Kopusov G. D., Khviyuzov S. S., Features of the temperature-frequency dependences of the electrophysical properties of vanillin alcohol as a model lignin compound, *Chem. Phys.* 548 (1 Aug) (2021) 111202.
15. Volkov A. S., Khviyuzov S. S., Analysis of temperature-frequency dependences of dielectric permittivity and specific conductivity of vanillin, *Opt. Spectrosc.* 133 (2) (2025) 125–131.
16. Cocinero E. J., Lesarri A., Écija P., et al., Competing hydrogen bonding in methoxyphenols: The rotational spectrum of *o*-vanillin, *J. Mol. Spectrosc.* 267 (1–2) (2011) 112–117.
17. Beni A. S., Chermahini A. N., Sharghi H., Theoretical studies of hydrogen bond interactions in 4-substituted benzoic acids dimers, *J. Korean Chem. Soc.* 55 (3) (2011) 392–399.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ХВИЮЗОВ Сергей Сергеевич — кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров ФГБУН Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск, Россия.

163020, Россия, г. Архангельск, Никольский пр., 20
khviyuzov.s@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-4810-2378

ВОЛКОВ Александр Сергеевич — старший преподаватель кафедры фундаментальной и прикладной физики Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия.

163002, Россия, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17
a.s.volkov@narfu.ru
ORCID: 0000-0002-3816-3441

THE AUTHORS

KHVIYUZOV Sergey S.

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences

20, Nikolsky Ave., Arkhangelsk, 163020, Russia
khviyuzov.s@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-4810-2378

VOLKOV Aleksandr S.

Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov

17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, 163002, Russia
a.s.volkov@narfu.ru
ORCID: 0000-0002-3816-3441

Статья поступила в редакцию 17.12.2025. Одобрена после рецензирования 15.04.2026. Принята 15.04.2026.

Received 17.12.2025. Approved after reviewing 15.04.2026. Accepted 15.04.2026.