

УДК 550.837:621.396.96

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА  
УПРУГОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ОТРАЖЕНИИ  
И ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ САПРОПЕЛЬ***Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян  
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Иванов Г.Н., Кривенко И.В.,  
Смирнова М.А., Испирян С.Р., 2023

**Аннотация.** Рассмотрена актуальная тема повышения возможностей звуколокационной съемки сапропелевых месторождений. Проведено математическое моделирование спектров отраженных и преломленных импульсов с учетом характерных зависимостей коэффициента поглощения от частоты, типичных для различных видов минеральных грунтов, так как изучение спектров отраженных и преломленных сигналов, возникающих при звуколокационном зондировании его слоев, дает информацию о количественном и качественном составе слоя. В результате вычислительных экспериментов получены зависимости интенсивности таких сигналов от частоты, позволяющие отличить сапропель от других видов грунта. Указано, что результаты исследований могут быть использованы при определении мощности и качества залегающих слоев без отбора проб путем соответствующего изменения параметров приемного канала аппаратуры и расшифровке спектров вышеназванных сигналов.

**Ключевые слова:** сапропель, минеральные грунты, сейсмоакустические методы, звуколокация, математическое моделирование, зависимость, коэффициент поглощения, частота, спектр, отраженный сигнал, преломленный сигнал.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-97-105****ВВЕДЕНИЕ**

Сапропель – илистые отложения пресных континентальных водоемов, содержащие свыше 15 % органических веществ. Материалом для образования сапропеля являются остатки организмов, населяющих толщу донных отложений (бентос), воду (планктон) и ее поверхность (макрофиты), а также поступающие с водосбора растворенные вещества и минеральные частицы. Формирование сапропеля происходит под воздействием биохимических, микробиологических и механических процессов. Минеральная часть сапропеля содержит большое количество микроэлементов (Co, Mn, Cu и др.). Сапропели богаты витаминами, каротиноидами, ферментами.

Общая площадь сапропелевых отложений Тверской области составляет 87 807 га с запасом сапропеля 747 700 000 тонн.

Сапропель используется как высокоэффективное экологически чистое удобрение при приготовлении питательных смесей и компостов. Некоторые виды сапропеля применяются как связующая добавка для производства буровых растворов, строительных материалов. Особую роль играет сапропель в медицине (служит бальнеологическим средством) [1, 2]

Цель сейсмоакустических исследований – изучение геологического разреза до глубины менее 100 м с разрешающей способностью 0,5–5 м. Во время таких исследований применяются в акваториях более высокочастотные (по сравнению с сейморазведкой) импульсные источники упругих волн, а также компактные буксируемые приемные системы.

В СССР работы с использованием сейсмоакустических методов в акваториях производились в МГУ (такими учеными, как А.В. Калинин, В.В. Калинин, Б.Л. Пивоваров и др.), МГРИ (здесь следует назвать таких сотрудников университета, как В.Л. Мирандов, А.Г. Длугач), ЛГУ (прежде всего Е.Ф. Дубровым).

В Тверском государственном техническом университете (в середине XX в. был Калининским политехническим институтом, КПИ), начиная с 60-х годов прошлого века, проводились работы по разведке озерных месторождений и определения его запасов методами сейсмоакустики.

С помощью сейсмоакустических методов, например звуколокации, акустического каротажа и акустического «просвечивания», изучают торф и сапропель как в условиях их естественного залегания, так и в лабораторных [3–10]. Все эти методы основаны на эксплуатации главным образом кинетических особенностей прохождения зондирующего импульса в различных средах. Динамические характеристики импульса и особенно изменение его спектрального состава практически не применяются.

Еще в 50-е годы прошлого века некоторые исследователи указывали, что форма отраженного от дна моря сигнала зависит от типа грунта [9]. В настоящее время изменение состава спектра упругого импульса используется для изучения свойств различных веществ, проводится спектральный анализ звуковой речи и т.д.

При отражении зондирующего упругого импульса от среды, обладающей поглощением упругих колебаний, последний претерпевает определенные изменения спектрального состава. Поскольку каждая среда обладает собственными упругими параметрами, обусловленными акустическими свойствами данной среды, трансформация спектрального состава зондирующего импульса может служить характеристикой данной отражающей среды.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Исследовано отражение и прохождение зондирующего акустического сигнала при его взаимодействии с сапропелем и минеральными грунтами методами математического моделирования. Проведены вычислительные эксперименты. Варьировались зависимости коэффициента поглощения от частоты, в том числе, нелинейная зависимость.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Проведен теоретический анализ возможных изменений спектрального состава зондирующего импульса.

Пусть зондирующий импульс задан функцией

$$f(t) = A \sin \omega_0 t$$

на временном интервале от 0 до  $\tau$ , где  $\tau$  – длительность импульса;  $A$  – его амплитуда колебаний;  $\omega_0 = 2\pi\nu_0$  ( $\nu_0$  – несущая частота).

Как известно, спектральная плотность непериодической на бесконечном интервале функции определяются выражением

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt ,$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  – циклическая частота;  $i = \sqrt{-1}$ .

Так как функция  $f(t)$  задана на конечном временном интервале, для нее применимо выражение текущей спектральной плотности:

$$S_{\tau}(\omega) = \int_0^{\tau} f(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Абсолютное значение (модуль) этой величины называется просто спектром:

$$\Phi(\omega) = |S(\omega)|.$$

Текущий спектр синусоиды определяется известным выражением:

$$\Phi_{\tau} = \frac{2A}{\omega_0 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)} \sin \frac{n\pi\omega}{2\omega_0}, \quad (1)$$

где  $n$  – число полупериодов в импульсе.

Графически зависимость (1) представлена кривой на рис. 1.

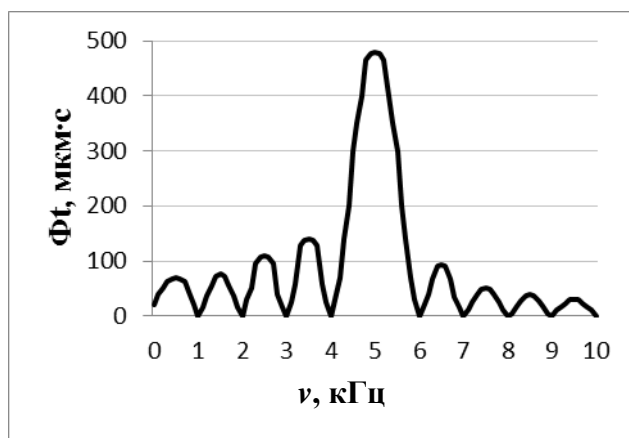


Рис. 1. Спектр зондирующего импульса

Исходные данные импульса:  $\tau = 1$  мс;  $\nu_0 = 5$  кГц;  $A = 0,1$  мм. Отраженный сигнал можно представить в виде

$$f_{от}(t) = f(t)K,$$

где  $K = ke^{-i\beta t}$  – комплексный коэффициент отражения среды;  $k$  – модуль коэффициента отражения;  $\beta$  – коэффициент затухания упругих колебаний в отражающей среде.

Следовательно, отраженный импульс в нашем случае можно представить следующим образом:

$$f_{от}(t) = Ake^{-i\beta t} \cdot \sin \omega_0 t,$$

а текущая спектральная плотность будет определяться выражением

$$S_{\tau от}(\omega) = \int_0^{\tau} Ake^{-i\beta t} \cdot \sin \omega_0 t \cdot e^{-i\omega t} dt. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что изменение спектра отраженного сигнала характеризуется модулем коэффициента отражения  $k$  и коэффициентом затухания  $\beta$ .

Модуль коэффициента отражения  $k$  мало влияет на изменение спектра отраженного сигнала, так как практически не зависит от частоты. Таким образом, изменение спектра отраженного сигнала описывается коэффициентом затухания или коэффициентом поглощения отражающей среды, который является функцией частоты упругих колебаний. Коэффициент затухания  $\beta$  характеризует уменьшение амплитуды упругих колебаний в среде с течением времени и функционально связан с коэффициентом поглощения  $\alpha$ , дающим представление об уменьшении амплитуды упругих колебаний по

мере их распространения в среде, согласно формуле

$$\alpha = \frac{\beta}{V},$$

где  $V$  – скорость распространения упругих колебаний.

В диапазоне частот, реально применимых в звуколокации ( $\nu_0 = 0,5\text{--}100$  кГц), дисперсия скорости звука в грунтах практически отсутствует, поэтому зависимость между коэффициентами затухания и поглощения можно считать линейной.

В литературе указывается два случая зависимости  $\alpha$  от частоты упругих колебаний в минеральных грунтах:

первый – в скальных грунтах, состоящих из изверженных, метаморфических и осадочных горных пород с жесткой связью между зернами, как правило, с большим содержанием  $\text{SiO}_2$  (кислые породы) или  $\text{MgO}$  (основные):

$$\alpha \cong \omega; \quad (3)$$

второй – в рыхлых (нескальных) грунтах аналогичного химического состава

$$\alpha \cong \omega^2. \quad (4)$$

В наших исследованиях для сапропелей – органоминеральных отложений пресных водоемов (с содержанием органического вещества более 15 %) – получена зависимость вида [6, 7]

$$\alpha \cong \sqrt{\omega}. \quad (5)$$

Можно полагать, что зависимости (3), (4) характерны для минеральных донных отложений, а зависимость (5) – для органических и органоминеральных отложений.

Спектры отраженных сигналов при одинаковом модуле коэффициента отражения рассчитаны на ЭВМ. Спектр сигнала, отраженного от сапропеля, представлен на рис. 2.

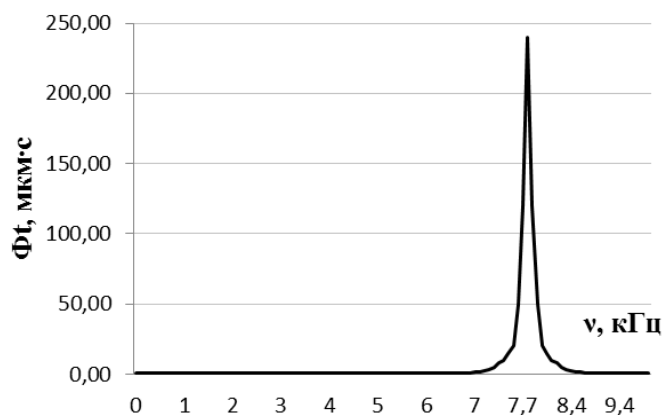


Рис. 2. Спектр импульса, отраженного от сапропеля

При отражении от сред с различными акустическими свойствами спектр отраженного сигнала значительно изменяется. Причем на изменение спектра оказывает влияние изменение как скорости звука, так и частотной зависимости коэффициента поглощения. Характерной особенностью изменения спектра зондирующего импульса является сдвиг основного максимума, а также его ширина. Уменьшение скорости звука в отражающем грунте вызывает смещение основного максимума спектра вправо, а увеличение показателя степени  $n$  в зависимости коэффициента поглощения от частоты смещает максимум спектра влево. Наибольший сдвиг наблюдается у сред с зависимостью

коэффициента от частоты вида (4), наименьший – от частоты вида (5). Спектры отраженных сигналов значительно уже зондирующего, то есть отражение идет практически на резонансной частоте отражающей среды. Длительность импульса при этом увеличивается.

Преломленный в среде импульс можно представить в виде

$$f_{\text{пр}}(t) = f(t)(1 - K)e^{-\alpha H},$$

где  $H$  – расстояние, пройденное преломленным импульсом в среде.

Спектральная плотность преломленного импульса определяется выражением

$$S_{\text{тпр}}(\omega) = \int_0^T (1 - ke^{-\beta t}) A \cdot \sin \omega_0 t \cdot e^{-\alpha H} e^{-i\omega t} dt.$$

Спектры преломленных сигналов при одинаковом модуле коэффициента отражения и на одинаковом расстоянии  $H = 1$  м от границы раздела рассчитаны на ЭВМ и изображены на рис. 3.

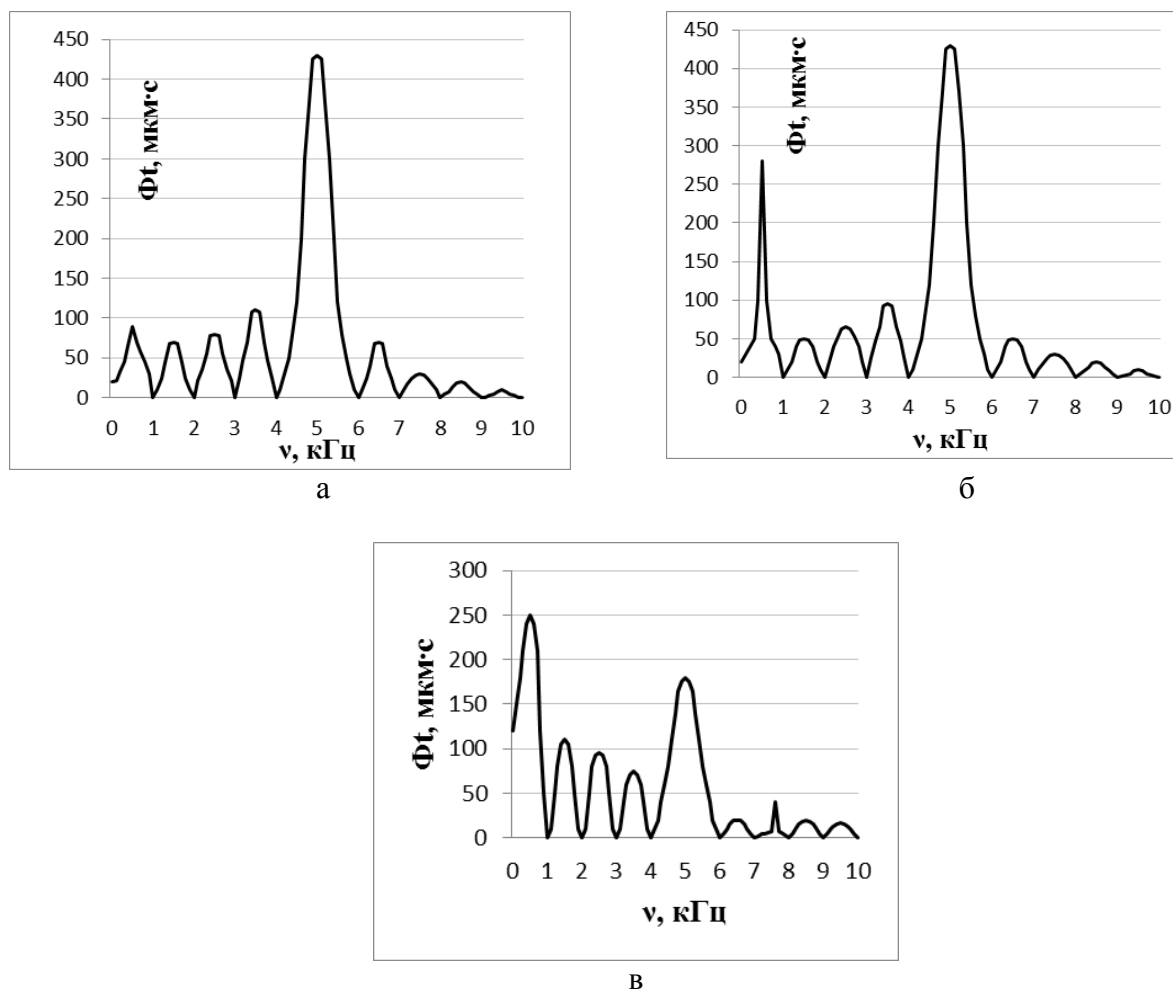


Рис. 3. Спектр импульса, прошедшего расстояние 1 м: а – в минеральном грунте (зависимость коэффициента поглощения от частоты моделируется формулой (4)) при скорости  $V = 2500$  м/с; б – в минеральном грунте (зависимость коэффициента поглощения от частоты моделируется формулой (3)) при скорости  $V = 2500$  м/с; в – в сапропеле (зависимость коэффициента поглощения от частоты моделируется формулой (5)) при скорости  $V = 1500$  м/с

Как видно из рис. 3, спектр сигнала при прохождении через различные среды претерпевает значительные изменения, которые связаны с акустическими свойствами этих сред. Так как коэффициенты поглощения и затухания возрастают с увеличением частоты колебаний, можно предположить, что по мере распространения сигнала его высокочастотные составляющие будут ослабевать быстрее, чем низкочастотные. Рассчитанные спектры подтверждают это предположение. При этом чем в большей степени  $\alpha$  зависит от  $\omega$ , тем быстрее ослабевают высокочастотные составляющие.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Изучение особенностей изменения спектральной плотности отраженных и преломленных импульсов на границе раздела сред (например, вода – горная порода) открывает широкие перспективы. Так, уже сейчас можно утверждать, что применение узкополосного, а тем более настроенного на резонансную частоту приемника упругих колебаний, при звуколокации донных отложений водоемов малоэффективно, так как значительное изменение спектрального состава сигнала происходит уже на первой отражающей границе (вода – донные отложения); при распространении в донных отложениях в результате селективного поглощения максимумы спектральной плотности смещаются в сторону меньших частот.

В практической звуколокации с приемником, настроенным на резонансную частоту излучателя, иногда отмечалось «необъяснимое исчезновение» записи отражающей границы. Это «исчезновение» можно объяснить тем, что в результате изменения спектра сигнала при отражении на резонансную частоту приемника в этом случае приходится уже минимум спектральной плотности полезного сигнала.

Узкая четкая запись на эхограммах минерального дна (особенно песчаного) объясняется, с одной стороны, резкой акустической границей, то есть большой разностью волновых сопротивлений воды и песчаника, а с другой – тем, что песчаник, обладая зависимостью коэффициента поглощения от частоты вида (4), значительно воздействует на спектр преломленного сигнала. При этом быстро ослабевают высокочастотные составляющие.

В органических и органоминеральных донных отложениях при отсутствии загазованности условия для распространения преломленного импульса более благоприятные (в силу зависимости коэффициента поглощения от частоты вида (5)), поэтому сигнал проникает на большую глубину, о чем свидетельствует и запись на эхограммах звуколокационной съемки (наличие широких полос, на фоне которых иногда прослеживаются границы с подстилающими породами).

Таким образом, изучение спектров отраженных и преломленных сигналов при звуколокационной съемке озер и сравнение их со спектром зондирующего импульса дают возможность качественного, а в дальнейшем и количественного анализа (при достаточно большом количестве статистических данных) пород, слагающих дно озера. Практическое освоение этого метода позволит уже в полевых условиях без отбора проб для анализа иметь качественные или количественные характеристики пород.

Кроме того, зная, как изменяет спектр та или другая порода, можно повысить информативность результатов звуколокационной съемки при определении мощности отдельных слоев путем соответствующего изменения параметров приемного канала аппаратуры.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Макаренко Г.Л. Оценка ресурсного потенциала природных объектов на примере Тверской области: учебное пособие. Тверь: ТГТУ. 2004. 148 с.
2. Макаренко Г.Л., Рудя С.В. Георесурсное районирование озерных месторождений сапропеля (на примере Старицкого района Тверской области) // *Наука сегодня: теоретические аспекты и практика применения: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции: в 10 ч.* Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком». 2011. Ч. 7. С. 90–93.
3. Гамаюнов Н.И., Яценко А.И., Иванов Г.Н. [и др.]. Применение звуколокации для разведки озер на сапропель и картирования донных осадков морского шельфа // *Разведочная геофизика: сборник статей. Вып. 72.* М.: Недра. 1976. С. 23–29.
4. Яценко А.И., Ильина Е.Д., Иванов Г.Н. Применение геофизических методов для изучения сапропелевых отложений в озерах // *Проблемы использования сапропелей в народном хозяйстве: Сборник статей.* Минск: Наука и техника. 1976. С. 55–62.
5. Методические указания по разведке озерных месторождений сапропеля / Е.Д. Ильина, Н.Г. Каблова, А.И. Яценко, Г.Н. Иванов. М.: [б. и.]. 1976. 114 с.
6. Воларович М.П., Яценко А.И., Иванов Г.Н. Исследование акустических свойств сапропелевых отложений // *Аппаратные и методические разработки в геофизике: Сборник статей.* Киев: Наукова думка. 1976. С. 24–33.
7. Иванов Г.Н. Исследование акустических свойств сапропелевых отложений в условиях естественного залегания // *Исследования торфяных месторождений: Межвузовский тематический сборник.* Калинин: КГУ. 1980. С. 33–39.
8. Сергеев Л.А., Алпатов М.Г. Определение грунта с помощью электронного осциллографа, подключенного к эхолоту. Наставление по примеру. Л.: Гидрограф. 1959. 132 с.
9. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Изд-во технико-теоретической литературы. 1957. 236 с.
10. Макаренко Г.Л. Прогнозная оценка качественных характеристик месторождений сапропеля водно-эрозионных озер методом звуковой геолокации // *Современные наукоемкие технологии.* 2014. № 3. С. 114–117.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

*ИВАНОВ Григорий Николаевич* – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры горного дела, природообустройства и промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

*КРИВЕНКО Ирина Валерьевна* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

*СМИРНОВА Марина Анатольевна* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mar-smir@yandex.ru

*ИСПИРЯН Светлана Рафаиловна* – кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Исследование изменения спектрального состава упругого импульса при отражении и прохождении через сапропель // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 4 (20). С. 97–105.

---

**RESEARCH CHANGES IN ELASTIC PULSE' SPECTRAL COMPOSITION  
DURING REFLECTION AND PASSAGE THROUGH A SAPROPEL**

*G.N. Ivanov, I.V. Krivenko, M.A. Smirnova, S.R. Ispiryan*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The current topic of increasing the capabilities of sonar survey of sapropel deposits is considered. Mathematical modeling of the spectra of reflected and refracted pulses has been carried out, taking into account the characteristic dependence of the absorption coefficient on the frequency characteristic of various types of mineral soils, since the study of the spectra of reflected and refracted signals arising from sonar sounding of its layers provides information about the quantitative and qualitative composition of the layer. As a result of computational experiments, the dependences of the intensity of such signals on the frequency were obtained, which make it possible to distinguish sapropel from other types of soil. It is indicated that the research results can be used to determine the power and quality of the underlying layers without sampling by appropriately changing the parameters of the receiving channel of the equipment and decoding the spectra of the above-mentioned signals.

**Keywords:** sapropel, mineral soils, seismoacoustic methods, sonar, mathematical modeling, dependence, absorption coefficient, frequency, spectrum, reflected signal, refracted signal.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*IVANOV Grigory Nikolaevich* – Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining, Environmental Management and Industrial Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

*KRIVENKO Irina Valer'ena* – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

*SMIRNOVA Marina Anatol'evna* – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics and applied mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mar-smir@yandex.ru

*ISPIRYAN Svetlana Rafailovna* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General physics, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru



**CITATION FOR AN ARTICLE**

Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryan S.R. Research changes in elastic pulse' spectral composition during reflection and passage through a sapropel // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 97–105.

УДК 616-092.4

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ IN VITRO  
ЛИЗОЦИМСОДЕРЖАЩИХ СУБСТАНЦИЙ  
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ПРЕПАРАТОВ  
С АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТЬЮ**

*С.А. Смирнова<sup>1</sup>, И.А. Любкевич<sup>1</sup>, А.И. Зорин<sup>1,2</sup>, Е.А. Миронов<sup>2</sup>, В.П. Молчанов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

<sup>2</sup>Научно-производственная фирма «Химмедсервис» (г. Тверь)

© Смирнова С.А., Любкевич И.А., Зорин А.И.,  
Миронов Е.А., Молчанов В.П., 2023

**Аннотация.** Представлены результаты разработки новой биотехнологической методики тестирования активности *in vitro* раствора фермента лизоцима, относящегося к классу гидролаз, и различных субстанций, производимых на его основе. В основу методики определения активности лизоцима положено его литическое действие на тест-культуру *Micrococcus Luteus*. Предложенная методика может быть использована на фармацевтических, биотехнологических и пищевых предприятиях для лабораторного контроля качества готовых препаратов, обладающих антимикробной активностью, а также в научно-исследовательской практике.

**Ключевые слова:** лизоцим, биотестирование, *in vitro*, литическое действие, *Micrococcus Luteus*, тест-культура, ферментативная активность, антимикробная активность, контроль качества.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-105-114**

**ВВЕДЕНИЕ**

Лизоцим (КФ 3.2.1.17) – антимикробный пептид, обладающий ферментативной активностью и положительным зарядом. Этот фермент относится к классу муреиновых гидролаз, переваривающих пептидогликан, содержащийся в бактериях [1].

Лизоцим содержит в активном центре два аминокислотных остатка, необходимых для катализа: глутаминовую кислоту в положении 35 и аспарагиновую в положении 52. Остатки глутаминовой (Glu35) и аспарагиновой кислот (Asp52) критичны для функционирования фермента, причем Asp52 ионизирован, а Glu35 нет [2, 3].