

## **РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН СКВОЗЬ ПРОНИЦАЕМЫЕ ПРЕПЯТСТВИЯ**

*Гюльнара Маратовна Воскобойникова*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscs.ru

*Марат Саматович Хайретдинов*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscs.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, профессор

В настоящей статье авторами выполнено математическое моделирование процессов распространения инфразвуковых акустических колебаний в нижней атмосфере при наличии растительного массива с учетом вносимой при этом силы трения. При этом из-за удаленности источника от растительности на расстоянии много большем длины акустической волны, волновой фронт ее принимается локально-плоским и анализ проводился в рамках 2D моделирования. Рассмотрена задача взаимодействия акустических волн, падающих под некоторым заданным углом на грунт, покрытый растительным слоем, и сейсмических волн, возникающих в грунте, в модели «воздух – растительный слой - грунт». Исследован вопрос о влиянии растительного массива на амплитуду акустических и сейсмических волн, возбуждаемых в грунте. В том числе оценено влияние коэффициента трения на скорость затухания акустических колебаний в растительной среде. Разработаны и реализованы алгоритм и программа расчета уровней акустического давления в разных средах с применением волнового уравнения для атмосферы, уравнений газовой динамики Эйлера для растительного покрова, уравнения упругости для грунта.

**Ключевые слова:** геоэкологические риски, прогнозирование, инфразвук, информативные факторы, уравнений газовой динамики, растительный слой.

## **PROPAGATION OF ACOUSTIC WAVES THROUGH PERMEABLE OBSTACLES**

*Gyulnara M. Voskoboynikova*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: gulya@opg.sscs.ru

*Marat S. Khairetdinov*

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscs.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Professor

In this article, the authors performed mathematical simulation of infrasound acoustic waves propagation in the lower atmosphere across a vegetation taking into account the frictional force. In this case, the analysis was carried out for the 2D model because a source was at a distance much greater than an acoustic wavelength and acoustic wave front is assumed to be locally flat. The prob-

lem of the interaction of acoustic wave falling at a given angle to the ground with a vegetation layer on the surface and seismic waves arising in the ground in the “air-vegetable layer-ground” model is considered. The question of the influence of the vegetable layer on amplitudes of acoustic and seismic waves excited in the ground is investigated. Including the influence of the friction coefficient on the rate of acoustic oscillations attenuation in a vegetable medium is estimated. The algorithm and a program for calculating acoustic pressure levels in different media using the wave equation for the atmosphere, Euler's gas dynamics equations for vegetable layer and the elasticity equation for the ground have been developed and implemented.

**Key words:** Geoecological risks, predication, infrasound, informative factors, gas dynamics equations, vegetable layer.

### *Введение*

Среди современных геоэкологических проблем важное место занимает проблема оценивания геоэкологических рисков для окружающей социальной и природной среды от воздействия мощных ударных акустических волн, порождаемых природно-техногенными событиями повышенной опасности, как например, мощными полигонными и карьерными взрывами, техногенными шумами автотрасс, вулканическими извержениями, землетрясениями и др. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического воздействия от массовых взрывов, которые определяют целостность промышленных и жилых объектов [1, 2]. Наряду с метеофакторами, которые усиливают экологические риски от взрывов [5, 6], существуют факторы, приводящие к эффекту ослабления акустических колебаний от взрывов. К ним можно отнести наличие снежного покрова [7-10], лесных массивов, рельефа местности на пути распространения акустических волн [11-17]. Решение задачи распространения акустических колебаний в таких условиях носит многофакторный характер и решение ее в полной постановке является достаточно сложным. Ранее авторами рассматривались частные постановки задач распространения акустических колебаний, связанные с оцениванием влияния отдельных факторов на характеристики распространения.

В настоящей статье оцениваются характеристики ослабления, вызванные влиянием растительного массива на поверхностное распространение акустических колебаний, порождаемые инфранизкочастотными вибрационными источниками. Рассматривается задача взаимодействия акустических волн, падающих под некоторым заданным углом на грунт, покрытый растительным слоем, и сейсмических волн, возникающих в грунте, в модели «воздух – растительный слой - грунт». Исследуется вопрос о влиянии растительного массива на амплитуду акустических и сейсмических волн, возбуждаемых в грунте. Построена система дифференциальных уравнений газовой динамики, волновых и упругих уравнений с граничными условиями. Она описывает распространение падающих и отраженных акустических волн в воздухе, а также распространение преломленных и отраженных акустических волн в растительном слое и сейсмических волн в упругом грунте для трехслойной модели «воздух-растительный

слой-грунт». Амплитуды и давления отражения и преломления акустических и сейсмических волн вычисляются и анализируются в зависимости от высоты растительного слоя.

Теоретические и экспериментальные исследования распространения акустических волн в растительном массиве с точки зрения их экологически защитных свойств от вредных техногенных акустических возмущений являются актуальными, но малоизученными. В настоящее время существуют лишь отдельные модели взаимодействия акустического возмущения с лесными массивами. Имеющиеся теоретические модели рассматривают достаточно частные случаи распространения акустического возмущения через массив. При решении многих практических задач приходится иметь дело с исследованием процесса взаимодействия волновых акустических ударных фронтов с различными типами препятствий (жесткими, импедансными и проницаемыми) для различных конфигураций преград и различных параметров возмущения [18-20]. Все большую актуальность приобретают такие экологические задачи как проблема защиты от техногенного шума посредством высадки полос деревьев вдоль крупных автомагистралей и железных дорог [18]. Известно, что шум от автострады является низкочастотным источником. В последнее время для решения задач акустики активно используются методы газовой динамики. Использование данного подхода позволяет исследовать более подробные модели с учетом климатических условий и рельефа местности, а также изучать распространение возмущений большой интенсивности. За полноту моделей приходится платить большей вычислительной сложностью.

### *Постановка задачи*

Рассмотрим задачу падения акустической волны под заданным углом на упругое полупространство с растительным слоем на поверхности для случая дальнего распространения акустических волн от инфранизкочастотного источника. Для решения поставленной задачи рассматривается 3-слойная модель, состоящая из воздуха, растительного массива (леса) и грунта. Распространяющаяся в атмосфере акустическая волна падает на растительный слой под некоторым углом  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ) к вертикали. В данной модели воздух занимает верхнее полупространство со скоростью звука  $c$  и плотностью  $\rho$ . Растительный массив представляет собой проницаемое препятствие и характеризуется коэффициентом трения  $\alpha$ , физический смысл которого связан с эффектом поглощения, которое создает проницаемое препятствие (растительный массив). Коэффициент трения  $\alpha$  зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления  $c_d$  и удельной плотности поверхности растительности (листьев и ветвей)  $S$ . Грунт, занимающий нижнее полупространство, характеризуется плотностью  $\rho_g$ , скоростями продольных и поперечных волн  $V_p$  и  $V_s$ . Исследуется вопрос о том, насколько растительный массив поглощает акустические колебания и насколько уменьшается амплитуда акустической волны

в зависимости от свойств массива. При этом принимается условие об удаленности источника от массива на расстоянии много большем длины акустической волны, поэтому волновой фронт ее принимается локально-плоским и анализ проводится в рамках 2D моделирования.

Для воздуха решаются волновые уравнения с постоянной плотностью и скоростью звука. Волновые уравнения для давления в воздухе, а также связь скоростей и давлений имеет вид:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \Delta p = 0; \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla p = 0, \quad (1)$$

где  $p$ ,  $\vec{u}=(u_x, u_z)$  и  $c$  – давление, вектор скорости перемещения воздушных частиц и скорость звука в воздухе. Решение уравнения (1) можно представить в виде гармонических волн. Тогда результирующее давление в воздухе будет представлено как сумма давлений падающей и отраженной волн:

$$P = P_0 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z} + P_1 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z}. \quad (2)$$

Здесь  $k_x, k_z$  – проекции волновых векторов по осям  $x$  и  $z$

Рассмотрим постановку двумерной задачи взаимодействия акустических волн с растительным массивом. Данная задача основана на системе уравнений Эйлера и может быть записана в покомпонентном виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \\ \frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\alpha}{\rho} u_x \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\alpha}{\rho} u_z, \end{cases} \quad (3)$$

где  $u_x, u_z$  – компоненты вектора скорости перемещения воздушных частиц,  $\rho$  – плотность воздуха,  $c$  – скорость звука,  $\alpha$  – коэффициент трения в лесу. В результате приходим к выражению, зависящим только от давления  $p$ :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) + \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) можно представить также в виде суммы давлений преломленной и отраженной волн:

$$P = P_2 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z} + P_3 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z}. \quad (5)$$

Коэффициент трения  $\alpha$  зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления  $c_d$  и удельной плотности поверхности растительности (листьев и ветвей)  $S$ .

В таблице приведены характеристики лесных массивов. Для реальных массивов характерно неравномерное распределение плотности поверхности растительности  $S$  по высоте.

Тип древостоя	Высота $H$ , м	$S$	$c_d$
Мелколиственный лес	10-30	1.2	0.02
Сосна	10-50	1.2	0.03
Кустарник	1-5	7	0.05

Граничными условиям на границе раздела «воздух – поверхность растительного массива» является равенство давлений и скоростей по компоненте  $z$  в обеих средах.

$$u_{z1}|_{z=0} = u_{z2}|_{z=0}, P_1|_{z=0} = P_2|_{z=0};$$

Акустическая преломленная волна, падающая на границу «растительный массив – грунт», учитывается в граничных условиях следующим образом: давление акустической волны с постоянной скоростью  $c$  и частотой  $\omega$  равно нормальному напряжению грунта. В итоге имеем следующие равенства:

$$\begin{aligned} \sigma_{xz\text{упр}}|_{z=h} &= 0, \sigma_{zz\text{упр}}|_{z=h} = p e^{i(\omega t - kx)} \\ u_{z\text{воздух}}|_{z=h} &= u_{z\text{упр}}|_{z=h} \end{aligned} \quad (6)$$

Для грунта решаются динамические уравнения упругости с постоянными характеристиками  $\lambda_{\text{упр}}, \mu_{\text{упр}}, \rho_{\text{упр}}$ :

$$(\lambda_{\text{упр}} + \mu_{\text{упр}}) \text{grad} \cdot \text{div} u_{\text{упр}} + \mu_{\text{упр}} \Delta u_{\text{упр}} - \rho_{\text{упр}} \cdot \frac{\partial^2 u_{\text{упр}}}{\partial t^2} = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) будем искать в виде потенциалов. Потенциалы  $\varphi$  и  $\psi$  связаны с полем смещения следующими формулами в общем виде:

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

и предполагая их зависимость от  $x, z, t$  в виде

$$\varphi = A \exp i(\omega t - kx - k_{\varphi z} z), \quad \psi = B \exp i(\omega t - kx - k_{\psi z} z). \quad (8)$$

Подставляя в граничные условия (6) потенциалы  $\varphi$  и  $\psi$  из (8), получим неоднородную систему уравнений для коэффициентов  $A$  и  $B$  в общем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_{xz}|_{z=0} &= \mu \left[ 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right]_{z=0} = 0, \\ \sigma_{zz}|_{z=0} &= \left[ \lambda \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + 2\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right]_{z=0} = \rho \exp^{i(\omega t - kx)};\end{aligned}\tag{9}$$

Имея значение амплитуды давления падающей волны  $P_0$  необходимо определить коэффициенты  $P_1, P_2, P_3, A$  и  $B$ , которые отражают амплитуды давлений отраженных и преломленных волн.

### ***Результаты численного моделирования***

Разработаны и реализованы программы моделирования для расчета уровней акустического давления колебаний волн с помощью математической модели, основанной на уравнениях (2)–(9). Проведены тестовые расчеты для отладки разработанных программ. Представлены численные результаты моделирования акустических волновых полей для трехслойной модели «воздух-лес-грунт». Вычислены значения акустического давления для преломленной и отраженной волн в случае прохождения гармонической акустической волны через лесной массив в грунт с учетом коэффициента трения. Отмечено, что наблюдается эффект поглощения энергии акустической волны. В качестве примера на рис. 1 изображены графики акустического давления для преломленной и отраженной волн соответственно в зависимости от угла падения  $\theta$  в случае прохождения акустической волны через лес при различных высотах 0, 5, 10, 50 метров, частота  $f=10$  Гц. На рис.1 виден отмеченный выше эффект поглощения. При высоте 50 м и  $\theta=90^\circ$  амплитуда акустического давления может уменьшаться более чем на порядок.

На рис. 2 изображены графики акустического давления для преломленной и отраженной волн соответственно в зависимости от угла падения  $\theta$  при частотах  $f=8, 15, 80$  Гц. Как видно из рис. 2, при увеличении частоты на порядок скорость затухания акустического давления выше почти в 10 раз.

На скорость диссипации влияет наличие ветра. На рис.3 показаны графики затухания акустического давления в лесу при частоте 8 Гц. На рис. 3 видно, что при ветре, дующем по направлению от источника к лесу, акустическое давление больше, чем при ветре, дующем в противоположном направлении.

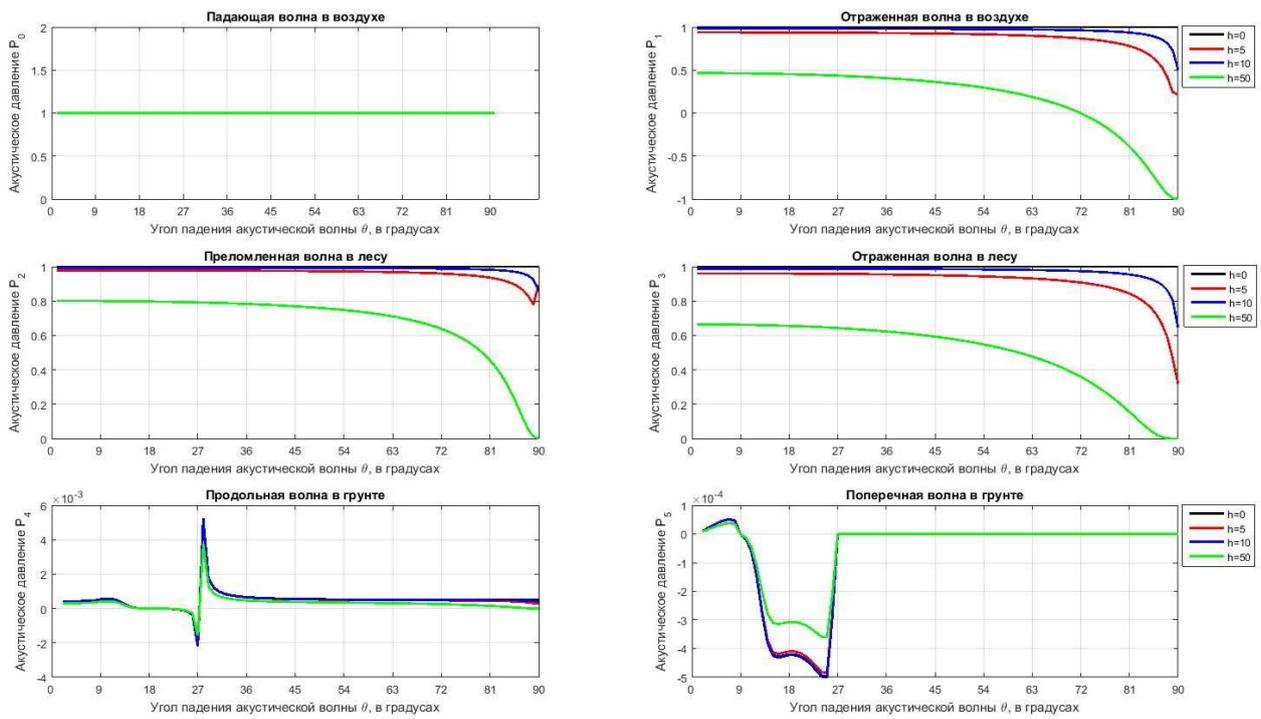


Рис. 1. Графики зависимости акустического давления для преломленной и отраженной волн от угла падения  $\theta$  при прохождении акустической волны через лес при различных высотах  $H = 0, 5, 10, 50$  метров, частота  $f = 10$  Гц

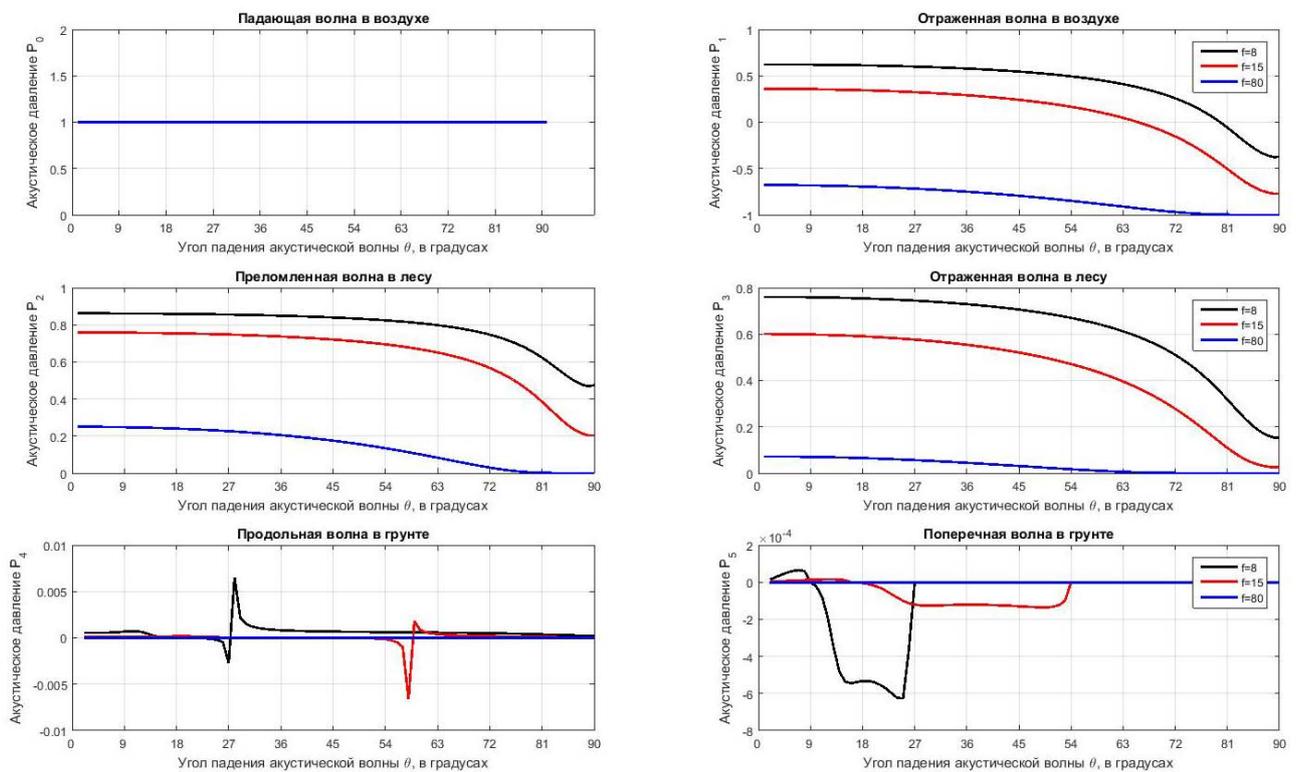


Рис. 2. Графики зависимости акустического давления для преломленной и отраженной волн от угла падения  $\theta$  при частотах  $f = 8, 15, 80$

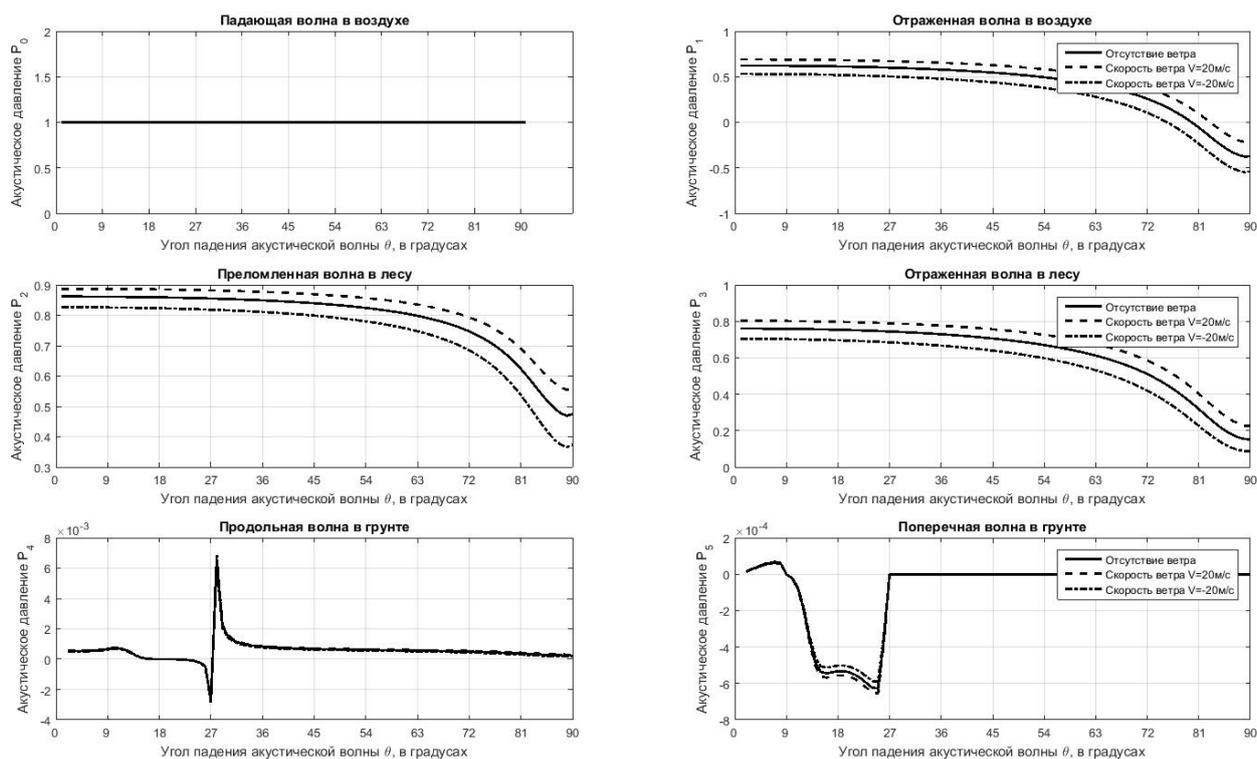


Рис. 3. Графики затухания акустического давления в растительном массиве при наличие ветра, частота  $f=8$  Гц. Сплошная линия – отсутствие ветра; штриховая – ветер по направлению от источника к лесу (20 м/с); штрихпунктирная – в противоположном направлении (-20 м/с)

### Заключение

Авторами статьи была рассмотрена задача падения акустической волны под заданным углом на упругое полупространство с растительным слоем на поверхности для случая дальнего распространения акустических волн от инфранизкочастотного источника. В связи с этим:

1. Выполнено математическое моделирование процессов распространения инфразвуковых акустических волн в атмосфере при наличии растительного массива с учетом вносимой при этом силы трения. Предполагалось, что на больших расстояниях от источника сферическое волновое поле локально плоское, что допускало 2D моделирование. Оценено влияние коэффициента трения на скорость затухания акустических колебаний в лесу.

2. Решена задача взаимодействия акустических волн, падающих под определенным углом на грунт с растительным слоем и сейсмических волн, возникающих в грунте в трехслойной модели «воздух-растительность-грунт». Для данной задачи анализировались условия и результаты решения задачи распространения акустических колебаний сквозь проницаемое препятствие в виде растительного массива.

3. Разработаны и реализованы алгоритм и программа расчета уровней акустического давления в разных средах с применением волнового уравнения для атмосферы, уравнений газовой динамики Эйлера для растительного покрова. В рамках созданной математической модели обоснован выбор начальных параметров и граничных условий и выполнены тестовые расчеты с помощью разработанных программ.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 16-07-01052, 17-07-00872).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gubarev V.V., Kovalevskii V.V., Khairtdinov M.S., Avrorov S. A., Voskoboinikova G. M., et al. Prediction of environmental risks from explosions based on a set of coupled geophysical fields. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014. – Vol. 50. – No. 4. – P. 3–13.
2. Khairtdinov, M., Kovalevsky, V., Voskoboinikova, G., Sedukhina, G. Vibroseismoacoustic Method in Studying of Geophysical Fields Interaction in Ground Atmosphere // Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference "Informatics, GeoInformatics and Remote Sensing" SGEM-2014, Bulgaria - Albena, Bulgaria. – 2014. – V.1. – P.925-931.
3. М.С. Хайретдинов, В.В. Ковалевский, Г.М. Воскобойникова, Г.Ф. Седухина. Оценка метеозависимых геоэкологических рисков от взрывов с помощью сейсмических вибраторов. // Технологии сейсморазведки. 2016 – № 3. – С. 132–138.
4. Multifactorial Prediction of Geoecological Risks from Powerful Explosions with Application the Vibroseismic method M.S. Khairtdinov, G.M. Voskoboynikova, V.V. Kovalevsky and G.F. Sedukhina // Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan, S.Korea. – 2017. – P. 350-354.
5. Михайленко Б.Г., Михайлов А.А. Численное моделирование распространения сейсмических и акусто-гравитационных волн для модели «земля-атмосфера» при наличии ветра в атмосфере // Сибирский журн. выч. математики. – 2014. – Т.17. – № 2. – С.149-162.
6. Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A. Numerical Modeling of Seismic And Acoustic-Gravity Waves Propagation In An "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Air // Numerical Analysis and Applications. – 2014. – Т. 7. – № 2. – С. 124-135.
7. Influence of Snow Cover on Seismic Waves Propagation Voskoboynikova G., Imomnazarov K., Mikhailov A., Tang, J.-G. Proceedings in AIP. Springer. – 2017. – V. 10187. – P. 697-703.
8. Voskoboynikova G., Shalamov K., Khairtdinov M., Kovalevsky V. Multifactor estimation of ecological risks using numerical simulation // AIP Conference Proceedings 1895, 120009 (2017).
9. Multifactorial Estimation of Geoecological Risks for Environment M.S. Khairtdinov, G.M. Voskoboynikova, Kh.Kh Imomnazarov and A.A. Mikhailov // Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan S.Korea. – 2017. – P. 334-338.
10. Имомназаров Х.Х., Михайлов А.А. Применение спектрального метода для численного моделирования сейсмических волн в пористых средах при наличии диссипации энергии // СибЖВМ. – 2014. – Т. 17. – №2. – С. 139-147.
11. Aleksandr A. Mikhailov, Valery N. Martynov Numerical modeling of the infrasonic and seismic waves propagation in the "Earth-Atmosphere" model with a curvilinear interface // AIP Conference Proceedings 1907. – 2017. – P. 030036.
12. Харченко С.В. Влияние рельефа городской территории на формирование акустической обстановки: эксперимент и моделирование // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. – 2016. – № 3. – С. 26-34.

13. Харченко С.В. К вопросу о применении гармонического анализа при количественной характеристике рельефа // Геоморфология, из-во Наука (М.). – 2017. – № 2. – С. 14-24.
14. Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors / T. Van Renterghem [et al.] // Applied Acoustics. – 2015. – №92. – P. 86-101.
15. Болысов С.И., Харченко С.В. Городской рельеф как фактор комфортности проживания населения // журнал «Вестник Московского университета». Серия 5: География, Изд-во Моск. ун-та (М.). – 2016. – № 1. – С. 21-28.
16. Kharchenko S.V. City Location On the River Network Pattern and The Effect of Relief On the Distribution of Urban Buildings // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – том 7. – № 5. – С. 1543-1549.
17. Сенющенко И. М. Акустические особенности распространения шума в пониженных формах рельефа местности // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2010. – № 5. – С. 91-99.
18. Ситник В.В. Моделирование влияния массива растительности на распространение акустических возмущений // Математическое моделирование. – 2007. – т.19. – №8. – С. 90-96.
19. Pierre Chobeau Modeling of Sound Propagation in Forests Using the Transmission Line Matrix Method. Study of multiple scattering and ground effects related to forests // Université du Maine, Le Mans, France. – 2014. – 147 P.
20. "The sound amplifying forest with emphasis on sounds from wind turbines" Elis Johansson // Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Applied Acoustics. Chalmers University of Technology. Sweden. – 2010. – 97 P.

## REFERENCES

1. Gubarev, V.V., Kovalevskii, V.V., Khairtdinov, M.S., Avrorov, S. A., Voskoboinikova, G. M., et al. (2014). Prediction of environmental risks from explosions based on a set of coupled geophysical fields. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 50(4). 3–13.
2. Khairtdinov, M., Kovalevsky, V., Voskoboinikova, G., Sedukhina, G. (2014). Vibroseismoacoustic Method in Studying of Geophysical Fields Interaction in Ground Atmosphere. Proceedings of the 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference "Informatics, GeoInformatics and Remote Sensing" SGEM-2014, Bulgaria - Albena, Bulgaria. 1. 925-931.
3. Khairtdinov, M.S., Kovalevskii, V.V., Voskoboinikova, G.M., Sedukhina, G.F. (2016). Otsenivanie meteo-zavisimyykh geoekologicheskikh riskov ot vzyryvov s pomoshch'yu seismicheskikh vibratorov [Estimation of meteo dependent geocological risks from explosions using seismic vibrators]. *Technologiya seismorazvedki [Technology of Seismic Survey]*, 3, 132-138. [in Russian]
4. M.S. Khairtdinov, G.M. Voskoboinikova, V.V. Kovalevsky and G.F. Sedukhina. (2017). Multifactorial Prediction of Geocological Risks from Powerful Explosions with Application the Vibroseismic method. Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan, S.Korea. 350-354.
5. Mikhailenko, B.G., Mikhailov, A.A. (2014). Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya seismicheskikh i acusto-gravitatsionnykh voln dlya modeli "Zemlya-atmosfera" pri nalichii vetra v atmosphere [Numerical Modeling of Seismic and Acoustic-Gravity Waves Propagation In "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Atmosphere]. *Sibirskii zhurnal vych. matematiki. [Siberian Journal of Computational Mathematics]*. 17(2). 149-162. [in Russian]
6. Mikhailenko, B.G., Mikhailov, A.A. (2014). Numerical Modeling of Seismic And Acoustic-Gravity Waves Propagation In An "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Air. *Numerical Analysis and Applications*. 7(2). 124-135.
7. Voskoboinikova, G., Imomnazarov, K., Mikhailov, A., Tang, J.-G. (2017). Influence of Snow Cover on Seismic Waves Propagation. Proceedings in AIP. Springer, 10187. 697-703.
8. Voskoboinikova, G., Shalamov, K., Khairtdinov, M., Kovalevsky, V. (2017). Multifactor estimation of ecological risks using numerical simulation. AIP Conference Proc. 1895, 120009.

9. Khairetdinov, M., Voskoboynikova, G., Imomnazarov, K., Mikhailov A. (2017). Multifactorial Estimation of Geocological Risks for Environment M.S. Proceedings of 12th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2017). Ulsan, S. Korea, 334-338.
10. Imomnazarov, K.K., Mikhailov, A.A. (2014). Primenenie spectral'nogo metoda dlya chislennogo modelirovaniya seismicheskikh voln v poristyh sredah pri nalichii dissipatsii energii [Application of a spectral method for numerical simulation of seismic waves in the porous media in the presence of energy dissipation]. Sibirskii zhurnal vych. matematiki [Siberian Journal of Computational Mathematics], 17(2), 139-147. [in Russian]
11. Mikhailov, A.A., Martynov, V.N. (2017). Numerical modeling of the infrasonic and seismic waves propagation in the "Earth-Atmosphere" model with a curvilinear interface. AIP Conference Proceedings 1907, 030036.
12. Kharchenko, S.V. (2016). Vliyanie rel'efa gorodskoi territorii na formirovanie acusticheskoi obstanovki: eksperiment i modelirovanie [Influence of city relief to formation of acoustic situation: experiment and simulation]. Vestnik VSU, S.: Geography. Geocology, 3, 26-34. [in Russian]
13. Kharchenko, S.V. (2017). K voprosu o primenenii garmonicheskogo analiza pri kolichestvennoi harakteristiki rel'efa [To question about harmonic analysis application at quantitative characteristic of relief]. Geomorphology, Nauka (M.), 2, 14-24. [in Russian]
14. Renterghem, T. Van [et al.] (2015). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors. Applied Acoustics, 92, 86-101.
15. Bolysov, C.I., Kharchenko, S.V. (2016). Gorodskoi rel'ef kak factor komfortnosti prozhivaniya naseleniya [City relief as factor of the comfort the habitation of population]. Vestnik MSU. S: Geography, (M.), 1, 21-28. [in Russian]
16. Kharchenko, S.V. (2016). City Location On the River Network Pattern and The Effect of Relief On the Distribution of Urban Buildings. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 7(5), 1543-1549.
17. Senjushchenkova, I.M. (2010). Akusticheskie osobennosti rasprostraneniya shuma v ponizhennykh formah rel'efa mestnosti [Acoustic features of noise propagation in lowered forms of relief]. Izvestia VUZov. Stroitel'stvo. [Universities News. Constructing], 5, 91-99. [in Russian]
18. Sytnik, V.V. (2007). Modelirovanie vliyaniya massiva rastitel'nosti na rasprostranenie akusticheskikh vozmushchenii [Simulation of the influence the vegetable massif to acoustic oscillation propagation]. Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical modeling], 19(8), 90-96. [in Russian]
19. Chobeau, Pierre (2014). Modeling of Sound Propagation in Forests Using the Transmission Line Matrix Method. Study of multiple scattering and ground effects related to forests. Université du Maine, Le Mans, France.
20. Johansson, Elis (2010). The sound amplifying forest with emphasis on sounds from wind turbines. Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Applied Acoustics. Chalmers University of Technology. Sweden.

© Г. М. Воскобойникова, М. С. Хайретдинов, 2018