

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. Ломоносова

---

ФАКУЛЬТЕТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И КИБЕРНЕТИКИ

На правах рукописи  
УДК 519.6:533.6.011

Ситник Василий Владимирович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ  
СКВОЗЬ МАССИВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2010

Работа выполнена на кафедре математической физики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
Лебедев Михаил Глебович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
Набоко Идея Михайловна

кандидат физико-математических наук,  
Зайцев Николай Альбертович

Ведущая организация: Институт проблем механики РАН

Защита состоится 21 апреля 2010 г. в    час.    мин. на заседании диссертационного совета Д 501.001.43 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, 2-й учебный корпус, факультет вычислительной математики и кибернетики, ауд. 685.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке факультета ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова. С текстом автореферата можно ознакомиться на официальном сайте факультета ВМК МГУ <http://cs.msu.su> в разделе «Наука» — «Работа диссертационных советов» — «Д 501.001.43».

Автореферат разослан «    » марта 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.43  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Захаров Е. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последнее время все большую актуальность приобретает изучение возможности использования растительных массивов как барьеров от воздействия различного рода газодинамических волновых фронтов природного и техногенного происхождения.

Другой аспект исследования связан с проблемой защиты от метеоритной опасности. Широко известным примером в этой области является, например, Тунгусское событие 1908 года, характеризовавшееся вывалом и ожогом леса на большой территории при вторжении небесного тела. Характеристики вторгнувшегося тела могут быть оценены на основании данных о произведенных им разрушениях. Для решения подобных задач метеоритики необходима более точная модель распространения сильного возмущения по земной поверхности с учетом сопротивления растительности и ее разрушения.

В указанных областях физическое моделирование на натуральных объектах в контролируемых условиях затруднено. В связи с этим основным методом исследования становится именно математическое моделирование.

Использование для моделирования современных высокопроизводительных вычислительных средств позволяет не только преодолевать возникающие вычислительные трудности, но и выйти на новый уровень в проведении математического моделирования изучаемых процессов. Стало возможным создавать новые более совершенные модели и использовать для моделирования более подробные алгоритмы, исследовать ранее не изученные аспекты моделируемых процессов и выявлять тонкие особенности их протекания.

**Цель работы.** Целью диссертации работы являлось построение и исследование модели взаимодействия массивов растительности с газодинамическими возмущениями различных типов и интенсивностей на основании полных уравнений газовой динамики. На основании разработанных моделей — создание численной методики, алгоритмов и комплекса программ для высокопроизводительных вычислительных систем для исследования взаимодействия газодинамических возмущений с жесткими и проницаемыми препятствиями. С помощью реализованной методики — исследование отражательных, пропускательных и дифракционных свойств препятствий в виде растительных массивов по отношению к различного вида волновым фронтам. Описание процессов и характерных структур течений, возникающих при прохождении газодинамических возмущений через растительный массив. Исследование реакции препятствия на распространение акустического сигнала. Разработка модели разрушаемого растительного массива для случая интенсивных возмущений.

**Научная новизна, теоретическая и практическая значимость.**

1. Исследованы отражательные, пропускательные и дифракционные свойства препятствий в виде лесных массивов по отношению к различного вида волновым фронтам в зависимости от характеристик массива.

2. Описаны процессы и характерные структуры течений, возникающих при прохождении газодинамических возмущений через растительный массив, что представляет основной механический интерес и позволяет охарактеризовать диссипативные свойства такого рода препятствий.
3. Промоделировано влияние массивов растительности на распространение акустических сигналов, исследовано влияние импедансных характеристик подстилающей поверхности и приземного ветра на скорость затухания сигналов в рамках используемой модели.
4. Разработана модель взаимодействия возмущений большой интенсивности с растительными массивами с учетом их разрушения. Промоделировано взаимодействие высоконапорных течений с протяженными лесостоями. Выявлены эффекты, проявляющиеся при взаимодействии такого рода возмущений с массивами растительности. Ранее существовавшие методики оценки размеров зон разрушения растительного массива при вторжении крупных космических тел не учитывали ни сопротивления, ни разрушаемости растительности.  
Для указанных классов явлений при наличии сопротивления со стороны массивов растительности и учете разрушаемости растительности постановка и решение задач в гидродинамическом приближении при рассмотренных диапазонах параметров моделей ранее не производилась.
5. Разработаны методики, алгоритмы и комплекс программ для суперкомпьютерного численного исследования взаимодействия газодинамических возмущений с жесткими и проницаемыми препятствиями.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах, конференциях и семинарах:

1. XII школе-семинаре «Современные проблемы аэрогидродинамики», Сочи, «Буревестник» МГУ, Россия, 2004;
2. VIII международном симпозиуме «Transport Noise and Vibration», Санкт-Петербург, Россия, 2006;
3. Всероссийской научно-практической конференции «Вычислительный эксперимент в аэроакустике», Светлогорск, Россия, 2006;
4. VII Международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, Украина, 2007;
5. XXXII Академических чтениях по космонавтике («Королёвские чтения»), МГТУ им. Баумана, Москва, Россия, 2008;
6. Научной конференции «Ломоносовские чтения», МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 2008;
7. Международной научной конференции «100 лет Тунгусскому феномену: прошлое, настоящее, будущее», РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 2008;
8. Научном семинаре под руководством профессора, д.ф.м.н. В.Б. Баранова в Институте проблем механики РАН;

9. Научном семинаре под руководством профессора, д.ф.м.н. В.П. Стулова в Институте механики МГУ;
10. Научном семинаре под руководством профессора, д.ф.м.н. Г.А. Тирского в Институте механики МГУ.

**Публикации.** Положения диссертации отражены в 6 публикациях автора [1–6] (две в изданиях, рекомендованных ВАК).

Выполнение исследований в рамках настоящей работы было поддержано грантами РФФИ: 01-01-00116-а, 02-07-90407-в, 04-01-00332-а, 05-07-90378-в, 07-01-00288-а, 08-01-00463-а, 09-07-00424-а.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 115 страницах, диссертация содержит 61 рисунок и 4 таблицы. Список литературы включает 80 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрывается актуальность темы работы, приводится краткое описание проблем и результатов, относящихся к теме диссертации. Приведен обзор существующих подходов к моделированию взаимодействия газодинамических возмущений различной интенсивности с массивами растительности. Кратко излагается структура и содержание работы по главам и основные полученные результаты.

**Первая глава** посвящена описанию постановки двумерной задачи о распространении газодинамических возмущений через массив растительности на основе уравнений Эйлера. Влияние растительности вводится в модель при помощи массовых сил сопротивления. Разрушаемость растительности не учитывается. Наряду с постановкой задачи, описывается используемая при моделировании численная методика, основанная на параллельной реализации метода Годунова, и приводятся результаты исследования ее корректности на ряде одномерных задач и задачах обтекания пластин и цилиндрических тел.

В *п. 1.1.1 § 1.1* описывается постановка двумерной задачи о распространении волнового фронта сквозь массив растительности конечной высоты  $H_0$  и протяженности  $L$ . Область, занятая растительностью, представляет собой часть более обширной области  $\Omega = \{(x, y) | x \in [0, X_{max}], y \in [0, Y_{max}]\}$ , в которой решалась система газодинамических уравнений Эйлера:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) &= 0 \\
 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \times \operatorname{rot}(\vec{v}) &= -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad}(p) + \frac{\vec{F}}{\rho} \\
 \frac{\partial e}{\partial t} + \operatorname{div}([e + p]\vec{v}) &= \vec{F}\vec{v},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $e = \rho \left( \frac{p}{(\gamma-1)\rho} \right) + \frac{\vec{v}}{2}$ .

Влияние растительности в указанной подобласти моделировалось введением массовых сил сопротивления  $\vec{F}$ . Вне проницаемого препятствия эти силы равны нулю  $\vec{F} = 0$ .

На нижней границе области, представляющей собой земную поверхность, ставились либо условия непротекания  $v_n = 0$ , либо импедансные граничные условия  $p' = Zv_n$ . На верхней и правой границах расчетной области ставились «мягкие» граничные условия  $\frac{\partial f}{\partial n} = 0$ ,  $f \in (p, \rho, u, v)$ . Условия на левой границе и начальные условия зависели от конкретного типа возмущения.

В соответствии с моделью<sup>1</sup> Дубова, Быковой, Марунич, которая является в настоящее время общепринятой, сила сопротивления растительности пропорциональна скоростному напору потока газа и зависит от двух коэффициентов:

$$\vec{F} = -\rho c_d S |v| \vec{v}. \quad (2)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления  $c_d$  характеризует тип растительности. При помощи коэффициента удельной плотности поверхности элементов растительности  $S$  можно моделировать особенности реальных растительных массивов. Типичные значения  $c_d$  и распределения коэффициента  $S$  для исследуемых типов растительных массивов приведены в п. 1.1.2.

В п. 1.1.3 описываются три типа рассматриваемых начальных возмущений: ударная волна с известной скоростью фронта  $D$ , нелинейный акустический импульсный сигнал с плоским профилем и гармонический акустический сигнал малой интенсивности.

Начальное возмущение типа ударной волны формировалось заданием распределения параметров газа в начальный момент времени.

В правой подобласти задавались параметры невозмущенной среды:  $p_R = 1/\gamma$ ,  $\rho_R = 1$ ,  $u_R = 0$ . В левой подобласти параметры определялись из условий Ренкина-Гюгонио таким образом, чтобы фронт возникшей ударной волны двигался вправо со скоростью  $D$ :

$$u_L = \frac{2}{\gamma + 1} (D - 1/D); \quad \rho_L = \frac{D}{D - u_L}; \quad p_L = Du_L + 1/\gamma.$$

Возмущением типа нелинейного акустического сигнала можно представить фронт сферического взрыва на достаточном удалении от источника, когда передний фронт можно считать плоским<sup>2</sup>.

В начальный момент времени на некотором расстоянии от препятствия задавалось распределение горизонтальной компоненты скорости в виде части

<sup>1</sup> А.С. Дубов, Л.П. Быкова, С.В. Марунич. Турбулентность в растительном покрове, Л.: Гидрометеодиздат, 1982. 184с.

<sup>2</sup> Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика, М.: Наука, 1986. 736 с.

параболы:

$$u = A(x - x_0)(x - b) \text{ на } [x_0, x_1].$$

Остальные параметры рассчитывались по формулам для простой бегущей волны:  $\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \frac{u}{c_0}\right)^{\frac{2}{\gamma-1}}$ ,  $p = p_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \frac{u}{c_0}\right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}$ .

Также исследовалось распространение сквозь лесной массив гармонического акустического сигнала, создаваемого в неподвижной среде цилиндрическим источником малого, но конечного радиуса  $r_0$ . Ось источника параллельна кромке препятствия и лежит на поверхности земли на расстоянии  $D$  от передней кромки растительного массива.

На поверхности цилиндрического источника задано возмущение давления  $p(t) = p_0 + p'(t)$ . Считая возмущение  $p'(t)$  малым, получим из уравнений газовой динамики остальные граничные условия на поверхности источника:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\rho_0 c_0^2 \frac{\partial u'}{\partial r}; \quad \rho' = \frac{\gamma p'}{c_0^2}.$$

Будем считать, что возмущение давление гармоническое с заданной частотой  $p'(t) = A_p \cos(\omega t)$  и будем рассматривать только волны, выходящие из источника. В начальный момент времени невозмущенные значения параметров среды полагались равными  $\vec{v}_0 = (V, 0)$ ,  $\rho_0 = 1$ ,  $p_0 = 1/\gamma$ .

Рассматривались случаи низких частот (около 100 Гц) и высоких частот (1000 Гц), что соответствует двум пикам в экспериментально замеренных спектрах шума автострады<sup>3</sup>. Амплитуда сигнала также соответствовала замеренному уровню шуму нагруженной автострады.

Все численные исследования в работе проведены на основе единого методологического подхода, основанного на разностном методе С.К.Годунова<sup>4</sup>. Математическим аспектам организации методики посвящен § 1.2. Особенности программной реализации численной методики, позволяющим использовать ее для расчетов на многопроцессорных вычислительных системах посвящена глава 4.

В пункте 1.2.1 приводится покомпонентный вид рассматриваемой системы уравнений Эйлера(1) в дивергентном виде, на основании которого будет строиться численная методика. Пункт 1.2.2 посвящен задаче Римана об одномерном распаде разрыва, решение которой является элементарным действием в используемом методе. В пункте 1.2.3 приводится соответствующая разностная задача для метода Годунова. Отметим, что метод Годунова обеспечивает первый порядок аппроксимации по пространству и времени, обла-

---

<sup>3</sup>J.J. Houdt, T. Goeman, P.A. Breugel, M. Springborn. Influence of Road Surface on Traffic Noise: A Comparison of Mobile and Stationary Measuring Techniques // Noise Control Engineering Journal, November-December, 1993, P. 60-73.

<sup>4</sup>С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокоров. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

дает свойствами монотонности и дивергентности.

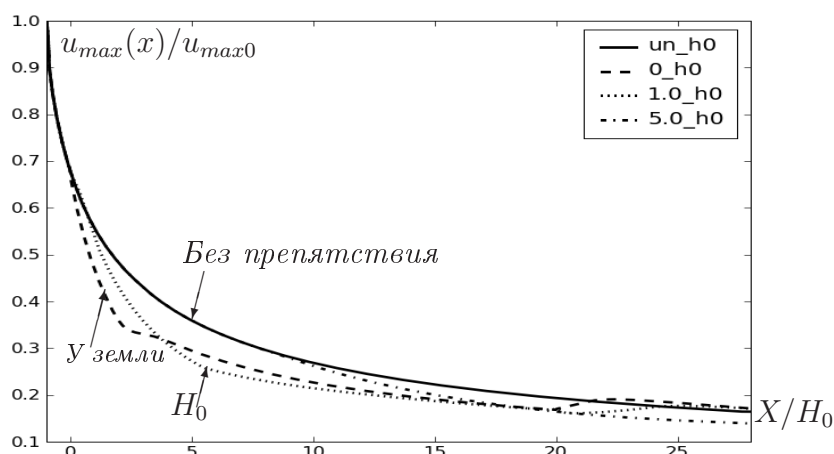
§1.3 посвящен тестированию корректности численной методики. Корректность методики тестировалась на ряде одномерных задач с известным аналитическим решением (п. 1.3.1) и на двумерных и осесимметричных задачах сверхзвукового обтекания тел с угловой точкой (п. 1.3.2). Проведенные расчеты показали хорошее соответствие с экспериментальными данными и результатами расчетов по другим методикам.

На основании проведенных методологических исследований можно сделать вывод, что данная численная методика может быть использована при моделировании нестационарных процессов распространения возмущений в растительных массивах.

**Во второй главе** по результатам численных расчетов исследовались отражательные, пропускательные и дифракционные свойства проницаемых препятствий в виде растительных массивов по отношению к различного вида волновым фронтам.

Описаны результаты моделирования взаимодействия волновых фронтов различного типа с растительными массивами без учета их разрушения. В ходе расчетов варьировались параметры как возмущений так и растительных массивов (протяженность и тип растительности).

В § 2.1 исследуется процесс распространения сквозь растительность нелинейного акустического сигнала. Как показано в п. 2.1.1 при взаимодействии нелинейного акустического сигнала с массивом растительности практически отсутствует отражение от кромок препятствия. Вместе с тем, при взаимодействии с растительностью возрастает скорость диссипации возмущения.



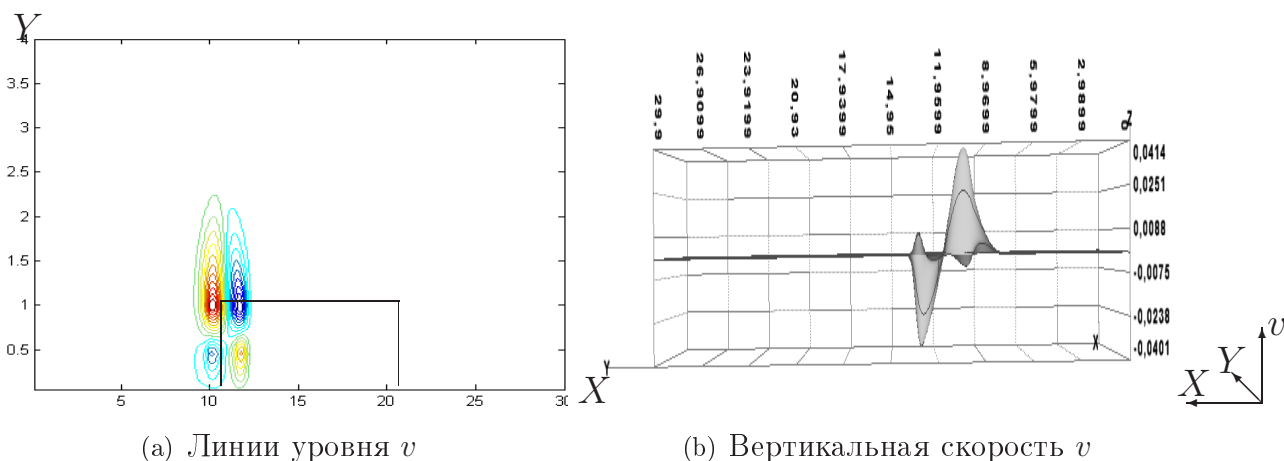
**Рис. 1.** Затухание нелинейного сигнала  $u_{max} = 1.5c_0$  на различных высотах при прохождении без влияния и сквозь массив растительности.

На рис. 1 изображены графики затухания амплитуды нелинейного сигнала  $u_{max} = 1.5c_0$  при его свободном прохождении (сплошная линия) и при взаимодействии с препятствием. Пунктирная линия соответствует прохождению сигнала у поверхности земли. Точки – прохождению в вершинах деревьев. Штрих - пунктир – на высоте пяти высот леса.



В рассматриваемом случае различие скоростей диссипации сигнала при свободном прохождении и при прохождении сквозь растительность достигает 20%. Влияние растительности проявляется и на высоте нескольких высот леса. Также наблюдается искривление переднего фронта возмущения. При переходе дальней границы препятствия у поверхности земли наблюдается эффект некоторого восстановления возмущения, связанный с возрастанием горизонтальной компоненты скорости за дальней границей препятствия.

Более детальный анализ численных решений, проведенный в п. 2.1.2, раскрывает причины отмеченных выше эффектов и позволяет охарактеризовать механизм диссипации.



**Рис. 2.** Ослабление импульса  $u_{max} = 1.5$  внутри лесного массива.  
Фронт  $x = 13.0$

При взаимодействии с границами проницаемого препятствия (см. рис. 2), т.е. при переходе из области с одним сопротивлением в область с другим сопротивлением, происходит формирование характерных структур течения — пар восходящих / нисходящих потоков.

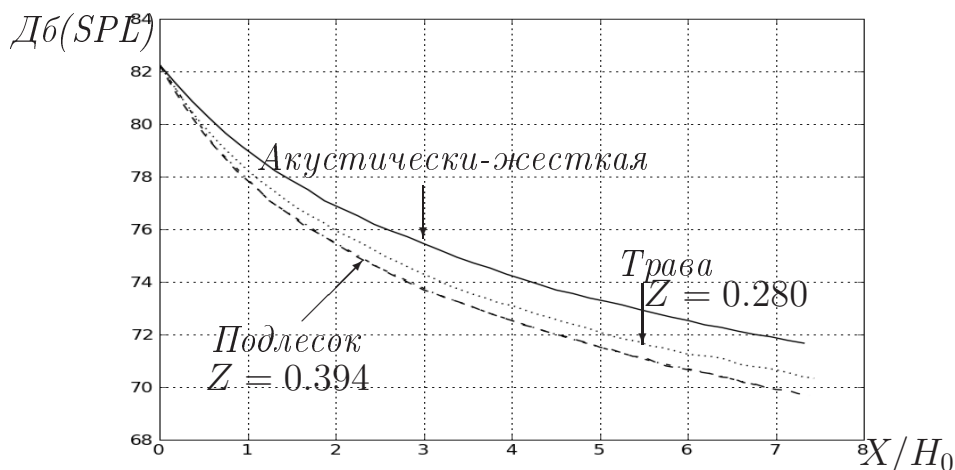
В дальнейшем структуры, возникшие внутри проницаемого препятствия, распространяются далее со скоростью потока за передним фронтом возмущения. После прохождения возмущения за дальнюю границу массива происходит постепенное размывание потоков на кромках препятствия и возвращение к невозмущенной конфигурации.

Аналогичные процессы происходят и при взаимодействии ударной волны с лесным массивом (§ 2.2). Отличительной особенностью распространения ударной волны, обусловленной наличием движущейся среды за фронтом возмущения, является формирование с течением времени головной ударной волны перед препятствием (п. 2.2.1). Остаточная картина аналогична сверхзвуковому обтеканию твердого тела. Но головная волна отходит на меньшее расстояние от торца проницаемого препятствия по сравнению со сплошным телом.

В § 2.3 представлены результаты исследования процессов распространения сквозь массив растительности гармонического акустического сигнала.

В п. 2.3.1 показано, что растительность фактически «прозрачна» для такого вида возмущений. Имеются соответствующие экспериментальные подтверждения<sup>5,6</sup> «прозрачности» растительности. Предполагается, что кажущийся эффект затухания шума при прохождении сквозь массив растительности связан с психологическими особенностями восприятия звука и визуальным экранированием шумящих объектов<sup>7</sup>.

В п. 2.3.2 показано, что наибольшее влияние на процесс диссипации возмущения оказывает импедансная подстилающая поверхность.



**Рис. 3.** Затухание сигнала (100 Гц) при прохождении на импедансной поверхности. Сплошная линия — над жесткой подстилающей поверхностью как при отсутствии, так и сквозь растительность; слившиеся штрихи и штрих-пунктир — сквозь растительность и при ее отсутствии над импедансной подстилающей поверхностью (лесным пологом,  $Z = 0.394$ ); пунктир — свободное распространение над лужайкой ( $Z = 0.280$ ). Горизонтальная ось — расстояние от левой границы лесного массива; вертикальная — уровень шума по шкале Дб(SPL)

На рис. 3 слившиеся верхние две кривые соответствуют свободному распространению возмущения и распространению возмущения сквозь растительность над акустически жесткой нижней границей. Видно, что влияние растительности никак не сказывается. Нижняя пунктирная кривая соответствует распространению сигнала частотой 100 Гц над подстилающей поверхностью с импедансом, характерным для лесного полога  $Z = 0.394$ . В этом случае наличие акустически нежесткой подстилающей поверхности увеличивает скорость затухания сигнала примерно на 2Дб на 100м.

Значимость импедансности подстилающей поверхности подтверждается многочисленными экспериментальными работами по измерению скорости затухания акустических сигналов при прохождении над акустически нежесткими поверхностями.

<sup>5</sup> V. Bucur. Urban forest acoustics. Springer, 2006. P. 181.

<sup>6</sup> Th.D. Rossing. Springer handbook of acoustics. Springer, 2007. P. 1182.

<sup>7</sup> D.E. Aylor, L.E. Marks Perception of noise transmitted through barriers // J. Acoust. Soc. Am., 59, 1976. P. 397-400.

Незначительное влияние на скорость затухания возмущения оказывает наличие приземного ветра (*n. 2.3.3*).

Выводы по второй главе сформулированы в § 2.4.

**Третья глава** посвящена исследованию вопроса о разрушении растительного массива высоконапорными потоками газа, возникающими при вхождении в атмосферу крупных космических тел. Задача решается в осесимметричном приближении, что соответствует случаю ненаклонного падения тела.

Как и прежде, для моделирования происходящих процессов будем решать систему газодинамических уравнений Эйлера для идеального газа (1). В § 3.1 для рассматриваемой задачи представлена начальная конфигурация расчетной области. Предполагается, что ось симметрии совпадает с осью  $OY$ . На верхней и правой границе расчетной области ставятся мягкие граничные условия  $\frac{\partial f}{\partial n} = 0$ ,  $f \in (p, \rho, u, v)$ ; на нижней — условия непротекания  $v_n = 0$ . В начальный момент времени лесной массив занимает всю приземную часть расчетной области: его протяженность  $L = \infty$ .

Сама задача подразделяется на три этапа.

Первый этап, описанный в *n. 3.1.1*, — это взрыв в атмосфере Земли. На этой стадии используется известная модель «взрыв в полете»<sup>8,9</sup>, в соответствии с которой масса, плотность и скорость газового объема  $\omega$  полагаются равными соответствующим параметрам твердого тела. Давление внутри объема  $\omega$  полагается равным давлению торможения на высоте взрыва твердого тела:  $p_0 = \rho(h)v_\infty^2$ , где  $\rho(h)$  — плотность атмосферы на указанной высоте,  $v_\infty$  — скорость входа тела в атмосферу.

Использование такого подхода позволяет, не прибегая к излишней детализации процесса разрушения тела в полете, рассматривать только происходящие газодинамические процессы.

На втором этапе, описанном в § 3.2, решается задача о движении продуктов взрыва в атмосфере.

Особенностям процесса эволюции возмущения до взаимодействия с поверхностью земли посвящен *n. 3.2.1*. Прежде всего, процесс движения тела в атмосфере планеты обладает существенной анизотропией<sup>10</sup>. В том смысле, что кинетическая энергия тела сопоставима с его внутренней энергией  $K \sim \varepsilon$  (в противоположность точечному взрыву). В процессе движения формируется довольно сложная структура возмущения. Можно выделить головную ударную волну, две подобласти с различным направлением горизонтальной скорости. Существенной особенностью является наличие «струйного ядра» — области у оси симметрии, в которой течение определяется прежде всего

---

<sup>8</sup> Л.В. Шуршалов. Взрыв в полете // Механика жидкости и газа, № 5, 1984, С. 126 — 129.

<sup>9</sup> В.И. Кондауров, А.В. Конюхов, В.В. Полухин, С.В. Утюжников. Математическое моделирование движения газового облака после взрыва метеорида в атмосфере // Механика жидкости и газа, № 1, 1998, С. 29 — 37.

<sup>10</sup> V.V. Shuvalov, N.A. Artemieva. Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planetary and Space Science, vol. 50, 2002. P. 181-192.

вертикальной компонентой скорости. Также можно выделить наличие торoidalного вихря на некотором расстоянии от оси симметрии.

Наконец, основной для нашей работы этап, описанный в § 3.3, связан непосредственно с разрушением растительного массива возмущением, достигшем поверхности земли.

В п. 3.3.1 приводится обзор ранее использовавшихся подходов к моделированию разрушения растительности. Отметим, что существовавшие до этого методики оценки размеров зон разрушения растительного массива при вторжении крупных космических тел не учитывали сопротивления и разрушаемости растительности.

Разнообразие факторов, участвующих в изучаемых процессах, их сложное взаимное влияние, наличие обратных связей не позволило сразу остановиться на какой-либо конкретной модели разрушения растительности газовыми потоками. По мере изучения влияния различных факторов на процесс разрушения растительности создавалась новая, более подробная модель.

Общему описанию разработанной в диссертации иерархии моделей разрушения растительности (см. рис. 4) газовым потоком посвящен п. 3.3.2.

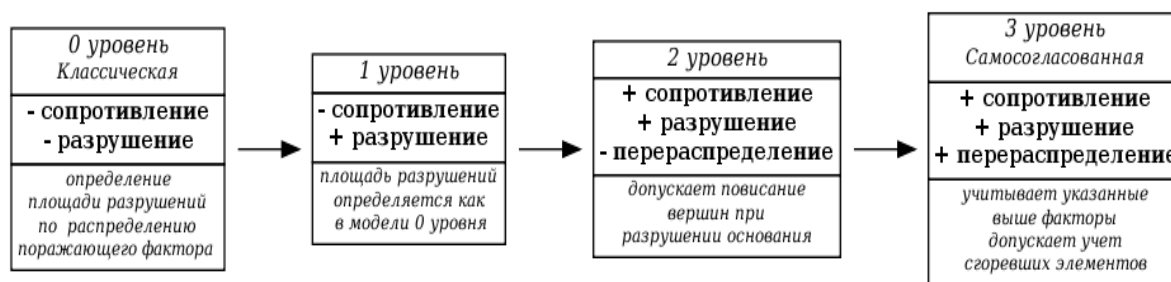


Рис. 4. Иерархия разработанных моделей разрушения

Отметим, прежде всего, что во всех принятых моделях разрушение происходит при превышении некоторым газодинамическим фактором  $f$  (в нашем случае  $f = 0.5\rho v^2$  — горизонтальная компонента скоростного напора) некоторого порогового значения, известного из эксперимента.

Модель нулевого уровня («классический подход») не учитывает ни сопротивления, ни разрушения растительности, но позволяет «задним числом» определить площадь разрушенной растительности по рассчитанному распределению поражающего фактора.

Модель первого уровня учитывает сопротивление, но не разрушение растительности. Площадь разрушенной растительности определяется в этой модели так же, как и в модели нулевого уровня.

Модель второго уровня, подробно описанная в п. 3.3.3, учитывает разрушение, но не перераспределение элементов растительности по высоте, т.е. как бы допускает повисание вершины дерева при разрушенном основании.

Наконец, модель третьего уровня (полностью самосогласованная модель) учитывает все вышеуказанные факторы.

Основные принципы, положенные в основу нашей модели, приводятся в п. 3.3.4.

Не останавливаясь на каком-либо конкретном факторе  $f$  разрушения растительности, будем полагать, что нам известны зависимости доли разрушаемой растительности  $0 \leq q^{dmg}(f) \leq 1$  от значения этого фактора и доли сгоревшей при разрушении растительности  $0 \leq q^{brn}(f) \leq q^{dmg}(f)$ .

Модифицируем выражение сил сопротивления со стороны растительности (2), введя долю сохранившегося лесостоя  $0 \leq s^{live} \leq 1$ :

$$\vec{F} = -s^{live} \rho c_d S |v| \vec{v}. \quad (3)$$

Для получения реалистичных распределений сохранившейся растительности потребуем невозрастания  $s^{live}$ . Тем самым полагаем, что не может сохраниться крон больше, чем поддерживающих эти кроны стволов. Положим также, что у поверхности земли может существовать слой накопления упавших элементов растительности высоты  $H_{btm} < H_0$ , который не подвержен разрушению. Это дает возможность моделировать возникновение завалов. Для удобства рассмотрим случай однородного по высоте растительного массива  $S = const$ .

Полагаем, что в каждый момент времени нам известно значение разрушающего фактора  $f = f(\vec{r}, t, \rho, \vec{v}, p)$ . Считая, что в рамках нашей модели перераспределение растительных элементов происходит только по высоте, опишем процесс перехода к новому значению  $\tilde{s}^{live}$  для фиксированного значения  $x$  (см. рис. 5).

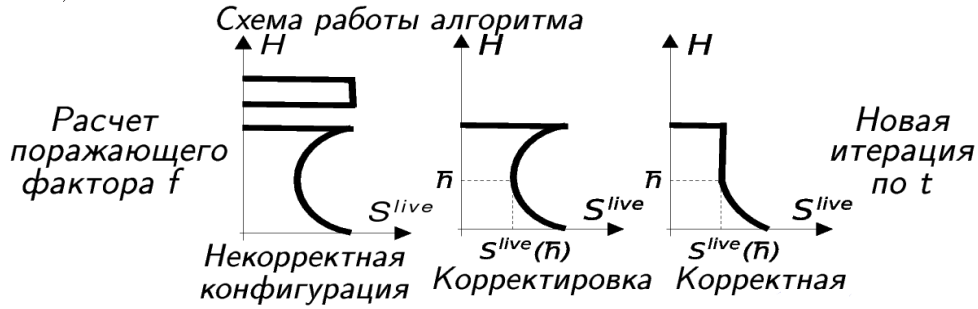


Рис. 5. Схема работы алгоритма

На первом этапе происходит разрушение растительности и накопление разрушенных элементов в нижнем слое:

$$\tilde{s}^{live}(y, f) = \begin{cases} [1 - q^{dmg}(f)] s^{live}(y), & y > H_{btm} \\ s^{live}(y) + \frac{1}{H_{btm}} \int_{H_{btm}}^{H_0} [q^{dmg}(f) - q^{brn}(f)] s^{live}(\bar{y}) d\bar{y}, & y \leq H_{btm}. \end{cases} \quad (4)$$

На втором этапе выясним высоту  $\bar{h}$ , на которой заканчивается невоз-

растание плотности элементов растительности  $\bar{h} = \max_{[H_{btm}, H_0]} \{h | \forall y < h : \tilde{s}^{live}(h) < \tilde{s}^{live}(y)\}$ . Затем происходит обрушение лишней растительности, находящейся выше  $\bar{h}$ , и ее перераспределение в нижнем слое:

$$\tilde{s}^{live}(y) = \begin{cases} \tilde{s}^{live}(\bar{h}), & y > \bar{h} \\ \tilde{s}^{live}(y) + \frac{1}{H_{btm}} \int_{\bar{h}}^{H_0} [\tilde{s}^{live}(\bar{y}) - \tilde{s}^{live}(\bar{h})] d\bar{y}, & y \leq H_{btm}. \end{cases} \quad (5)$$

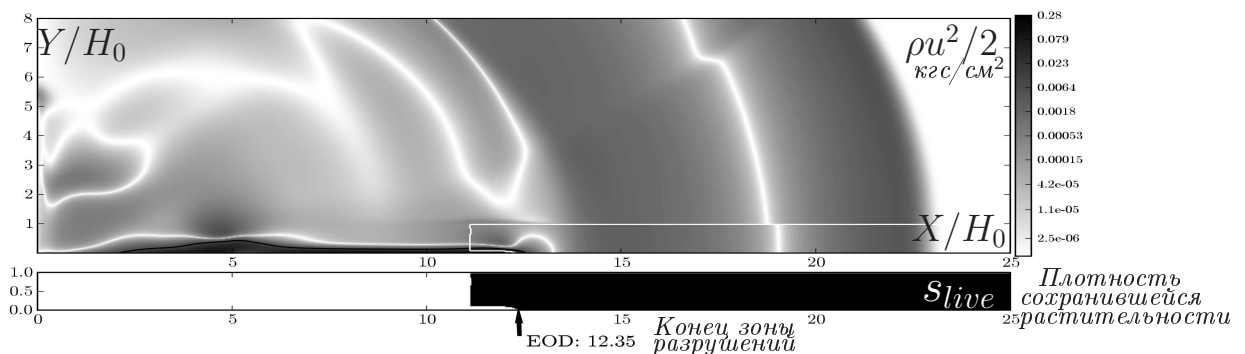
В итоге получаем новое распределение плотности сохранившегося древостоя  $\tilde{s}^{live}$ , которое будет использоваться в ходе дальнейшего моделирования для вычисления массовых сил сопротивления при помощи выражения 3.

Разработанный в диссертации алгоритм, реализующий указанные модели и включающийся на каждом шаге численного интегрирования системы уравнений газовой динамики при наличии массива растительности, детально описан в п. 3.3.5.

На основе разработанных моделей и алгоритмов выполнено моделирование взаимодействия продуктов сильного взрыва в атмосфере с растительным массивом (для случая хвойного леса) в широком диапазоне определяющих параметров (мощность и высота взрыва). Результаты этого моделирования описаны в § 3.4.

Для каждой конфигурации начального возмущения (высоты и интенсивности) моделировались ситуации разрушения растительности, как с использованием разработанной полной самосогласованной модели, так и классической методики, не учитывающей сопротивления и разрушаемости растительности (п. 3.4.2).

В п. 3.4.2 описаны результаты моделирования разрушения растительного массива с использованием простой пороговой модели без учета обрушения растительности. В начальный момент времени у оси симметрии на высоте  $H = 5H_0$  задавалось возмущение радиусом  $R = 0.1H_0$  с параметрами  $M = 3.5$  и  $\rho = 1.5 \text{ г/см}^3$ . Считалось, что при превышении горизонтальным скоростным напором величины в  $0.045 \text{ кгс/см}^3$  происходит полное разрушение растительности.



**Рис. 6.** Простая пороговая модель разрушения растительности

Распределение горизонтального напора  $\rho u^2$  (вверху), плотность сохранившейся растительности (внизу)

Показано, что разрушение растительности может происходить в два этапа (см. рис. 6). На первом этапе растительность разрушается фронтом ударно-волновой структуры, возникающей при отражении возмущения от поверхности земли. Этому соответствует плоский торец сохранившегося растительного массива (черной области в нижнем прямоугольнике). На втором этапе основную роль в разрушении массива играет растекание «струйного ядра» от оси симметрии у поверхности земли. В иллюстрируемом случае используется модель без учета обрушения растительности и вторжение струйного ядра хорошо заметно на фоне плоского торца сохранившегося массива. Конец зоны разрушения растительности показан стрелкой. Цифра у стрелки характеризует размер зоны вывала в высотах массива. В ряде случаев наблюдается возникновение зоны неразрушенной растительности у оси симметрии.

В п. 3.4.3 представлены результаты моделирования разрушения растительного массива с использованием многуровневой пороговой модели с учетом обрушения растительности. Использование этой модели позволяет учитывать неполное разрушение растительности и избегать некорректных конфигураций сохранившейся растительности (повисания растительности).

Наиболее интересными свойствами обладает полная самосогласованная модель разрушения растительности, учитывающая формирование завалов у поверхности земли. Результаты моделирования с применением этой модели представлены в п. 3.4.4.

Прежде всего, формирование завалов оказывает значительное положительное влияние на скорость диссипации возмущения. Кроме того, впервые удалось промоделировать эффект, связанный с формированием тонкой структуры вывала.

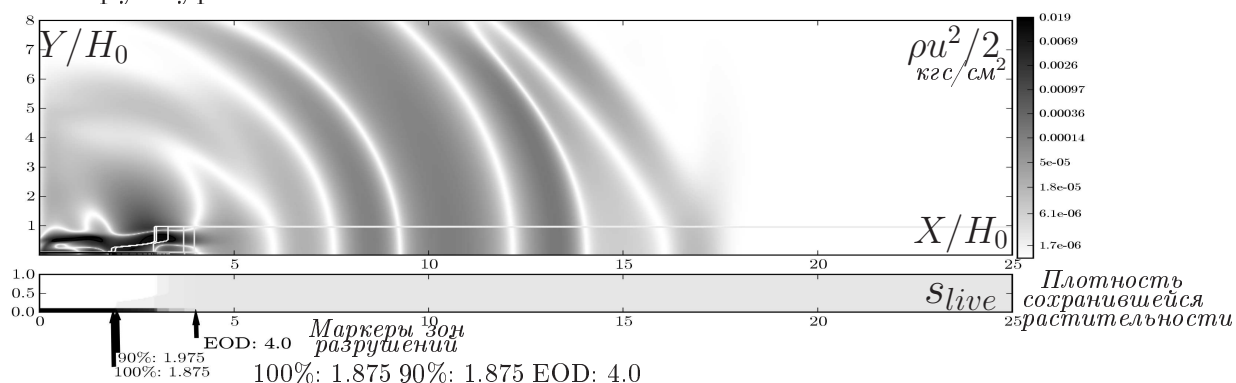


Рис. 7. Модель разрушения растительности с учетом формирования завалов

Распределение горизонтального напора  $\rho u^2$  (вверху), плотность сохранившейся растительности (внизу)

На рис. 7 представлен процесс разрушения растительности возмущением с начальными параметрами  $H = 5H_0$ ,  $R = 0.2H_0$ ,  $M = 1.25$  и  $\rho = 0.5\text{г}/\text{см}^3$ . В ходе моделирования считалось, что превышение горизонтальной компонентой скоростного напора порога в  $0.055\text{ кгс}/\text{см}^2$  ( $5394\text{ Н}/\text{м}^2$ ) приводит к 100% разрушению лесостоя; порога в  $0.045\text{ кгс}/\text{см}^2$  ( $4412\text{ Н}/\text{м}^2$ ) — к 90% разрушению; в  $0.020\text{ кгс}/\text{см}^2$  ( $1961\text{ Н}/\text{м}^2$ ) — к 30% разрушению; в  $0.010\text{ кгс}/\text{см}^2$  ( $981\text{ Н}/\text{м}^2$ ) — 10% разрушению. При напоре  $0.008\text{ кгс}/\text{см}^2$  ( $785\text{ Н}/\text{м}^2$ ) разрушается

менее 5% растительности. Если моделировалось возникновение завалов, их максимальная высота полагалась равной  $H_{btm} = 0.10H_0$ .

Наличие завалов приводит к вытеснению высоконапорных потоков газа от поверхности земли. В результате возможно формирование такой картины течений, когда разрушение растительности происходит только в верхней части крон деревьев.

В п. 3.4.5 рассматривается вопрос о влиянии типа модели и ее модификации на скорость диссипации возмущения. Показано, что наибольший эффект от влияния растительности на распространение возмущения достигается при использовании полных самосогласованных моделей с учетом формирования завалов. В этом случае, оценки положения границы неразрушенного лесостоя, полученные с использованием построенных полных моделей, существенно (на 30%-60%) разнятся с оценками, полученными с использованием традиционных методик. Поскольку последние не учитывают влияние растительности и разрушаемость лесостоя.

В п. 3.4.6 показано, что увеличение начальных высот и энергий возмущения существенно не сказывается на предлагаемой методике оценки размеров зон наземных разрушений. Выявлено, что падение возмущения с фиксированной начальной энергии с меньшей высоты не всегда означает, что размеры зон вывала будут больше, чем при падении с большей высоты. Чем более интенсивным приходит возмущение к поверхности земли, тем более компактным оно будет и тем большая часть энергии возмущения отразится от поверхности земли и тем меньшая часть будет задействована в разрушении растительности.

Выводы по третьей главе сформулированы в § 3.5.

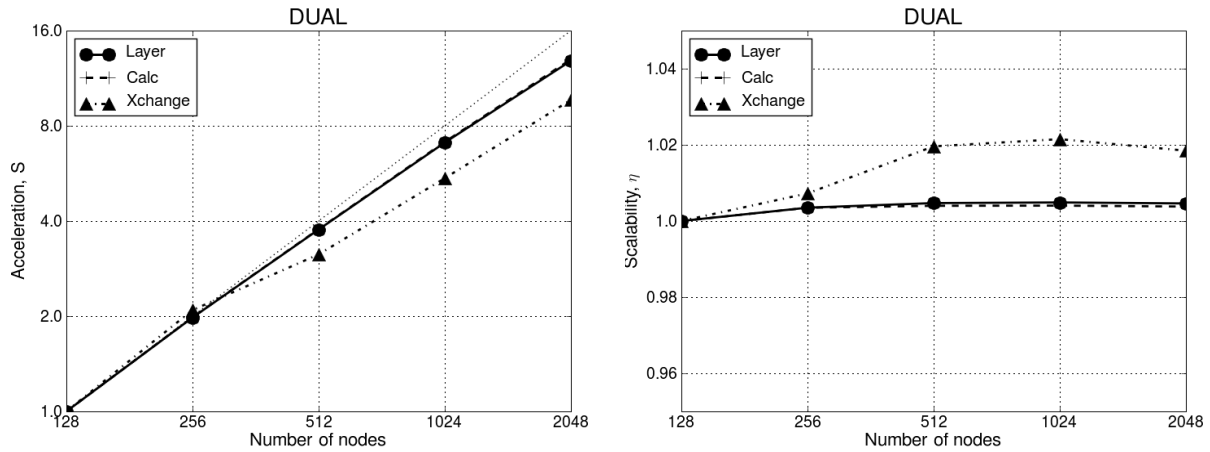
**Четвертая глава** посвящена особенностям реализации программного комплекса для суперкомпьютерного моделирования взаимодействия газодинамических возмущений с массивами растительности. Использование технологий параллельного программирования позволило реализовать численный метод Годунова для эффективного проведения расчетов на различных вычислительных системах.

В §. 4.1 приведен обзор архитектуры программного комплекса. В п. 4.1.1 описана структура программного комплекса. П. 4.1.2 посвящен особенностям реализации вычислительного ядра. В п. 4.1.3 описана реализация подсистемы ввода/вывода с использованием библиотек NetCDF и Parallel NetCDF. П. 4.1.2 посвящен вопросам окончательной обработки и визуализации данных.

В §. 4.2 описываются особенности параллельной реализации вычислительного ядра для систем с общей памятью (п. 4.2.1, с использованием технологии OpenMP) и систем с разделенной памятью (п. 4.2.2, с использованием технологии MPI). Проводится анализ эффективности распараллеливания



вычислительного ядра для систем IBM p690 Regatta и IBM Blue Gene/P<sup>11</sup>.



(a) Ускорение,  $S$

(b) Масштабируемость,  $\eta$

**Рис. 8.** Ускорение  $S$  и масштабируемость  $\eta$  модельной задачи на Blue Gene / P (DUAL)

Сплошная линия с кружками — ускорение при расчете слоя, штриховая с + — вычисление на слое, штрих-пунктир с треугольниками — обмены на слое

На рис. 8 приведены графики ускорения  $S(N_{\text{проц}}) = \frac{T(N_{\text{баз}})}{T(N_{\text{проц}})}$  и масштабируемости  $\eta = \frac{T(N_{\text{баз}}, M_{\text{баз}})}{T(N_{\text{проц}}, \frac{N_{\text{проц}}}{N_{\text{баз}}} M_{\text{баз}})}$  в режиме DUAL.

Показано, что предложенный алгоритм эффективно масштабируется до тысяч процессоров и сеток из миллиардов расчетных ячеек.

Выводы по четвертой главе сформулированы в § 4.3.

**В заключении** приведены основные результаты диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель взаимодействия различных газодинамических возмущений с массивами растительности. Создан комплекс программ для высокопроизводительных вычислительных систем, предназначенный для исследования взаимодействия газодинамических возмущений с жесткими и проницаемыми препятствиями.
2. Методами математического моделирования исследованы отражательные, пропускательные и дифракционные свойства лесных массивов по отношению к различного вида газодинамическим возмущениям для широкого диапазона параметров. Установлены характерные физические структуры течений, возникающие при прохождении газодинамических возмущений и определяющие диссипативные свойства проницаемых препятствий.
3. Показано, что массив растительности оказывается «прозрачным» для акустического гармонического сигнала. Наблюдаемое незначительное затухание возмущения вызвано наличием импедансной подстилающей поверхности.

<sup>11</sup>Подробнее о высокопроизводительных вычислительных комплексах факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова можно узнать на сайте [www.hpc.cmc.msu.ru](http://www.hpc.cmc.msu.ru)

4. Разработаны математические модели разрушения растительности газовым потоком. На их основе исследованы процессы разрушения массива растительности потоками газа, образующимися при вхождении в атмосферу космических объектов.
5. В ходе моделирования было также выявлено, что оценки положения границы неразрушенного лесостоя, полученные с использованием построенных полных моделей, существенно разнятся с оценками полученными с использованием традиционных методик. Поскольку последние не учитывают влияние растительности и разрушаемость лесостоя.
6. Предложенная модель разрушения массивов растительности может быть использована при исследовании различных аспектов взаимодействия крупных метеорных тел с земной поверхностью.

#### ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] *Лебедев М.Г., Ситник В.В.* К расчету течений сжимаемого газа с бесконечными градиентами скорости и давления // Прикладная математика и информатика. — 2005. — № 20. — С. 40–57.
- [2] *Лебедев М.Г., Ситник В.В.* Моделирование взаимодействия волнового фронта с массивом растительности // Прикладная математика и информатика. — 2006. — № 21. — С. 48–71.
- [3] *Sitnik V.V.* Influence of forest canopy on the traffic noise propagation // *8<sup>th</sup> International Symposium Transport Noise and Vibration*. — Russia, St. Petersburg: 2006. — CD-ROM.
- [4] *Лебедев М.Г., Ситник В.В., Юшина М.Я.* К анализу механизма прохождения акустической волны через лесозащитную полосу // Физика и ее применение в современной технике. Сборник научных трудов МАДИ (ГТУ). Под ред. Л.Г. Сапогина. — 2006. — С. 57–75.
- [5] *Ситник В.В.* Моделирование влияния массива растительности на распространение акустических возмущений // Матем. моделирование. — 2007. — Т. 19, № 8. — С. 90–96.
- [6] *Ситник В.В.* Разрушение лесного массива ударной волной, вызванной падением крупного космического тела // Химическая физика. — 2009. — Т. 28, № 5. — С. 45–55.