

ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**Международная конференция**  
**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ**  
**И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ – 2015**  
посвященная 90-летию со дня рождения академика Г. И. Марчука

**ТЕЗИСЫ**

19–23 октября 2015  
Академгородок, Новосибирск, Россия

УДК 519.6

ББК 22.19

Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015", посвященная 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука. Тезисы. Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Новосибирск. 19–23 октября 2015 г. Новосибирск: Академиздат, 2015. 186 стр.

ISBN 978-5-9907241-5-0

Конференция АПВПМ-2015 посвящена 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука – выдающегося ученого и организатора науки, признанного специалиста в области вычислительной математики, математического моделирования, физики атмосферы и океана, иммунологии и медицины.

Целью конференции является привлечение специалистов по численному анализу, прикладной математике и вычислительным технологиям для обсуждения актуальных вопросов математики и математического моделирования, а также вопросов практического применения современных численных методов. Основные темы конференции: численный анализ, методы прикладной математики и математическое моделирование, параллельные и распределенные вычисления, информационные и вычислительные системы.

Конференция проводится при финансовой поддержке  
Федерального агентства научных организаций  
и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-01-20772

**Соорганизаторы конференции:**

Институт вычислительных технологий СО РАН

Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Институт систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН

Институт цитологии и генетики СО РАН

Новосибирский государственный университет

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН

**Золотой спонсор:**

Корпорация Intel

**Серебряные спонсоры**

Корпорация Hewlett-Packard

Корпорация EMC

Корпорация Schlumberger

Компания NVIDIA

Группа компаний РСК

Группа компаний ЦФТ

**При поддержке компаний:**

ЛЕДАС

Росинка Сибири

**Информационная поддержка:**

Газета "Наука в Сибири"

Газета "Поиск"

Сайт конференции: <http://conf.nsc.ru/amca15>

ISBN 978-5-9907241-5-0



**Академик Гурий Иванович Марчук  
(08.06.1925 – 24.03.2013)**

Конференция АПВПМ-2015 посвящена 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука. Г.И. Марчук – основатель и первый директор Вычислительного центра СО АН СССР (ныне Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН), основатель и первый директор Института вычислительной математики РАН, Председатель Сибирского отделения АН, Председатель Госкомитета по науке и технике СССР, Президент Академии наук СССР, Председатель Межведомственного научно-технического совета по космическим исследованиям при Академии наук СССР, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственных премий.

Гурий Иванович Марчук – выдающийся ученый, крупнейший специалист в области вычислительной и прикладной математики, математического моделирования, теории ядерных реакторов и переноса излучения, теории климата и прогноза погоды, физики атмосферы, океана и охраны окружающей среды, геофизики, медицины и иммунологии, автор более 350 научных работ.

Гурий Иванович Марчук – выдающийся организатор науки и образования. Он создал крупнейшую научную школу по вычислительной математике и математическому моделированию, уделял большое внимание развитию международных научных связей, активно работал над внедрением передовых достижений науки в различных сферах деятельности современного общества.

Возглавляя Сибирское отделение АН СССР (1975–1980 гг.), Госкомитет по науке и технике СССР (1980–1986 гг.), Академию наук СССР (1986–1991 гг.), Гурий Иванович внес значительный вклад в развитие Сибирского региона, города Новосибирска, Новосибирского Академгородка и других академических центров нашей страны. В 1978 году Г. И. Марчук инициировал программу "Сибирь". Это была программа подготовки кадров и участия науки в развитии производительных сил, человеческого потенциала и комплексного использования природных ресурсов Сибири.

Огромный вклад Г. И. Марчук внес в атомный проект и создание атомного подводного флота. Гурий Иванович был организатором международного проекта "Мировой океан", международных систем дистанционного зондирования Земли из космоса.

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

### Сопредседатели программного комитета:

академик В. П. Дымников (ИВМ РАН, Москва), чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин (ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск), академик А. Н. Коновалов (ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск), чл. -корр. РАН Г. А. Михайлов (ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск)

**Секретарь** : к.ф.-м.н. М. А. Боронина (ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск)

### Члены программного комитета:

В. И. Агошков	Москва, Россия	Л. А. Крукиер	Ростов-на-Дону, Россия
С. В. Алексеенко	Новосибирск, Россия	В. И. Кузин	Новосибирск, Россия
А. Е. Алоян	Москва, Россия	Ю. А. Кузнецов	Хьюстон, США
А. Л. Афендииков	Москва, Россия	В. Ф. Куропатенко	Снежинск, Россия
Д. Ж. Ахмед-Заки	Алматы, Казахстан	М. М. Лаврентьев	Новосибирск, Россия
В. А. Бабешко	Краснодар, Россия	Ю. М. Лаевский	Новосибирск, Россия
И. Б. Бадриев	Казань, Россия	R. Lazarov	Колледж-Стейшн, США
А. А. Бакланов	Женева, Швейцария	Б. Ю. Лемешко	Новосибирск, Россия
Г. Вао	Ханчжоу, Китай	А. K. Louis	Саарбрюккен, Германия
М. А. Бектемесов	Алматы, Казахстан	В. Н. Лыкосов	Москва, Россия
В. И. Бердышев	Екатеринбург, Россия	В. Л. Макаров	Москва, Россия
В. Б. Бетелин	Москва, Россия	В. Э. Малышкин	Новосибирск, Россия
И. В. Бойков	Пенза, Россия	А. Г. Марчук	Новосибирск, Россия
Г. А. Бочаров	Москва, Россия	А. М. Мацокин	Новосибирск, Россия
S. Brenner	Батон-Руж, США	С. Б. Медведев	Новосибирск, Россия
Р. Е. Björstad	Берген, Норвегия	Г. М. Мутанов	Алматы, Казахстан
И. В. Бычков	Иркутск, Россия	Р. Новиков	Париж, Франция
П. Н. Вабищевич	Москва, Россия	В. В. Пененко	Новосибирск, Россия
Ю. В. Василевский	Москва, Россия	О. Pignonneau	Париж, Франция
В. Н. Васильев	Санкт-Петербург, Россия	С. И. Репин	Санкт-Петербург, Россия
С. Н. Васильев	Москва, Россия	А. С. Родионов	Новосибирск, Россия
В. И. Васильев	Якутск, Россия	В. Г. Романов	Новосибирск, Россия
В. В. Васин	Екатеринбург, Россия	А. А. Романюха	Москва, Россия
В. В. Воеводин	Москва, Россия	Г. С. Ривин	Москва, Россия
А. Ф. Воеводин	Новосибирск, Россия	К. К. Сабельфельд	Новосибирск, Россия
Ю. С. Волков	Новосибирск, Россия	В. А. Садовничий	Москва, Россия
В. А. Вшивков	Новосибирск, Россия	В. М. Садовский	Красноярск, Россия
В. А. Галкин	Сургут, Россия	А. С. Саркисян	Москва, Россия
Б. М. Глинский	Новосибирск, Россия	В. М. Свешников	Новосибирск, Россия
R. Glowinski	Хьюстон, США	С. И. Смагин	Хабаровск, Россия
С. К. Годунов	Новосибирск, Россия	А. В. Старченко	Томск, Россия
С. С. Гончаров	Новосибирск, Россия	Т. А. Сушкевич	Москва, Россия
Е. П. Гордов	Томск, Россия	Т. Tang	Гонконг, Китай
J. Dongarra	Окридж, США	Н. М. Темирбеков	Усть-Каменогорск, Казахстан
С. М. Ермаков	Санкт-Петербург, Россия	Т. Liu	Пекин, Китай
Ю. Л. Ершов	Новосибирск, Россия	Е. Е. Тыртышников	Москва, Россия
В. Б. Залесный	Москва, Россия	О. В. Widlund	Нью-Йорк, США
О. А. Задворнов	Казань, Россия	M. F. Wheeler	Остин, США
J. Sundermann,	Гамбург, Германия	М. П. Федорук	Новосибирск, Россия
В. П. Ильин	Новосибирск, Россия	А. М. Федотов	Новосибирск, Россия
Р. И. Ильяев	Саров, Россия	В. М. Фомин	Новосибирск, Россия
М. Н. Калимолдаев	Алматы, Казахстан	А. Hasanov	Измир, Турция
Т. Ш. Кальменов	Алматы, Казахстан	В. А. Чеверда	Новосибирск, Россия
Б. А. Каргин	Новосибирск, Россия	J. Cheng	Шанхай, Китай
Г. М. Кобельков	Москва, Россия	Б. Н. Четверушкин	Москва, Россия
В. В. Ковалевский	Новосибирск, Россия	Р. М. Шагалиев	Саров, Россия
В. М. Ковеня	Новосибирск, Россия	В. В. Шайдуров	Красноярск, Россия
В. В. Козлов	Москва, Россия	Г. И. Шишкин	Екатеринбург, Россия
Н. А. Колчанов	Новосибирск, Россия	Ю. И. Шокин	Новосибирск, Россия
Г. К. Коротаев	Севастополь, Россия	М. И. Эпов	Новосибирск, Россия
В. И. Костин	Новосибирск, Россия	А. Г. Ягола	Москва, Россия
В. Н. Крупчатников	Новосибирск, Россия	М. Yamamoto	Токио, Япония

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

**Председатель организационного комитета** чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин

**Заместители председателя организационного комитета:** к.т.н. Ю. М. Зыбарев, проф. В. П. Ильин, проф. В. В. Ковалевский, проф. Ю. М. Лаевский, проф. А. Г. Марчук

**Секретарь:** к.ф.-м.н. А. В. Пененко

**Члены организационного комитета (ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск):**

Е. А. Берендеев, М. А. Боронина, К. В. Воронин, Г. М. Воскобойникова, Л. В. Вшивкова, Б. М. Глинский, М. А. Гордничев, В. А. Дедок, А. А. Дучков, Д. В. Есипов, А. А. Ефимова, О. Г. Заварзина, И. Н. Иванова, Х. Х. Имомназаров, Н. А. Каргаполова, С. Е. Киреев, С. Н. Косова, М. В. Крайнева, О. И. Криворотько, И. М. Куликов, М. А. Марченко, И. Н. Медведев, Д. А. Мигов, А. В. Петухов, А. С. Плаксиенко, Э. А. Пьянова, О. Д. Соколова, А. Г. Усов, П. Н. Ханхасаева, И. Г. Черных, Е. В. Чимаева, М. А. Шишленин.

## **Секция 1. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

### **Формулы обращения и их конечномерные аналоги для некоторых классов уравнений Вольтерра 1-го рода с разрывными ядрами**

*А. С. Апарцин*

В [1, 2] исследовалась связь интегральных моделей развивающихся систем, элементы которых разбиты на несколько возрастных групп, с интегральными уравнениями Вольтерра 1-го рода с разрывными ядрами. Теория таких уравнений еще только создается. Их разрешимость существенно зависит от выбора подходящей пары функциональных пространств исходных данных и решений.

В данной работе с использованием априорной информации, характерной для моделей развивающихся систем, получены формулы обращения как самих интегральных уравнений, так и их сеточных аналогов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-01425а).

Список литературы

1. Anatoly S. Apartsyn. On Some Classes of Linear Volterra Integral Equations // Abstract and Applied Analysis. 2014. Vol. 2014. Article ID 532409, 6 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/532409>.
2. Апарцин А. С. Неклассические уравнения Вольтерры I рода в интегральных моделях развивающихся систем // Электронное моделирование. 2014. Т. 36. № 3. С. 3-14.

### **Сходимость алгоритмов адаптации расчетных сеток для сингулярно возмущенных краевых задач**

*И. А. Блатов, Е. В. Кутаева*

Рассматривается метод Галеркина на сетках Н.С. Бахвалова [1] и Г.И. Шишкина [2]. Предполагается, что известно расположение пограничного слоя, но неизвестна его граница. Предлагаются алгоритмы апостериорной адаптации расчетных сеток и рассматриваются методы доказательства сходимости сеток к предельному разбиению и оценок погрешности приближенных решений на этом разбиении. Рассматривается семейство галеркинских проекторов, соответствующих поставленным задачам. Показано, что получение квазиоптимальных условно равномерных по малому параметру априорных и апостериорных оценок погрешности сводится к оценке специальных операторных норм семейств этих проекторов. Приводятся результаты численных экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-06584).

Список литературы

1. Бахвалов Н.С. К оптимизации методов решения краевых задач при наличии погранслоя // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1969. Т. 9. №4. С. 841-859.
2. Шишкин Г.И. Сеточные аппроксимации сингулярно возмущенных эллиптических и параболических уравнений. Екатеринбург, УРО РАН, 1992.

### **Numerical solution of problems for a space-fractional diffusion equation**

*P. N. Vabishchevich*

Nowadays, non-local applied mathematical models based on the use of fractional derivatives in time and space are actively discussed. Many models involve both sub-diffusion (fractional in time) and super-diffusion (fractional in space) operators. Super-diffusion problems are treated as evolutionary problems with a fractional power of an elliptic operator.

We have proposed [1] a computational algorithm for solving an equation for fractional powers of elliptic operators on the basis of a transition to a pseudo-parabolic equation. For the auxiliary Cauchy problem, the standard two-level schemes are applied. The computational algorithm is simple for practical

use, robust, and applicable to solving a wide class of problems. This computational algorithm for solving equations with fractional powers of operators is promising when considering transient problems.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 14-01-00785, 15-01-00026).

#### References

1. Vabishchevich, P.N.: Numerically solving an equation for fractional powers of elliptic operators. *Journal of Computational Physics* 282(1), 289–302 (2015).

### **Dynamic adaptive mesh construction for efficient numerical solving of a singular perturbed reaction-advection-diffusion equation**

*V. T. Volkov, D. V. Lukyanenko*

The work is based on the theory of the asymptotic-numerical investigation of generation and motion of fronts in phase transition models [1]. On the example of numerical solution of the Burger's equation with a small parameter with the higher derivative we discuss a method of dynamic adaptive meshes construction. For corresponding construction we use *a priori* information that is based on asymptotic analysis of the problem. In particular, we take into account some information about the speed of the transition layer, its width and structure. Our algorithms are able to significantly reduce the complexity of the numerical calculations in comparison with classical approaches for solving of this class problems.

The project has been partially supported by RFBR, project No. 14-01-31201 and No. 13-01-00200.

#### References

1. Volkov V. T., Nefedov N. N. Asymptotic-numerical investigation of generation and motion of fronts in phase transition models // *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin, 2013, v. 8236, 524-531.

### **Численное исследование особенностей применения потоковых схем расщепления на неравномерных сетках**

*К. В. Воронин, Ю. М. Лаевский*

В работе подробно рассматриваются особенности применения потоковых схем расщепления в смешанном МКЭ для решения задачи теплопереноса в случае использования неравномерных сеток. Потоковые схемы расщепления строятся на основе нового подхода, основная идея которого заключается в использовании скалярных схем расщепления для дивергенции теплового потока. Для потоковых схем расщепления были получены в двумерном и трехмерном случаях априорные оценки устойчивости по начальным данным и по правой части в подпространстве сеточного аналога пространства  $\mathbf{H}^{\text{div}}$  [1]. При этом на начальный тепловой поток накладываются требования повышенной гладкости, которой, в общем случае, начальный тепловой поток не обладает [2]. Основной вопрос, рассматриваемый в данной работе, заключается в численном исследовании возникающей потери безусловной устойчивости и разработке эффективных методов повышения гладкости начального теплового потока, применимых для решения прикладных задач.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-11-10024).

#### Список литературы

1. Воронин К.В., Лаевский Ю.М. Об устойчивости некоторых потоковых схем расщепления // *Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние*. - Новосибирск, 2015. - Т.18, №2. - С. 135-145.

2. Voronin K., Laevsky Y. A New Approach to Constructing Splitting Schemes in Mixed FEM for Heat Transfer: A Priori Estimates // *Finite Difference Methods, Theory and Applications*, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9045. 2015, p. 408-416.

### **Полулагранжев метод с преобразованием интеграла для трехмерного уравнения неразрывности**

*А. В. Вяткин*

В работе представлен численный алгоритм из семейства полулагранжевых методов для решения трехмерного уравнения неразрывности. Методы этого семейства основаны на точном тожде-



стве интегралов с областями интегрирования на соседних слоях по времени и являются безусловно устойчивыми. В большинстве из них основные вычислительные затраты ложатся на вычисление интеграла на предыдущем временном слое. В представленной версии метода для вычисления интеграла на предыдущем слое по времени проведена замена переменных, преобразующая область интегрирования из кривоугольного шестигранника в куб. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили существенное сокращение вычислительных затрат и общего времени расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-31203).

### **Параллельный вариант метода переменных направлений**

*Н. И. Горбенко*

В докладе предложен аддитивный вариант метода переменных направлений для решения систем линейных алгебраических уравнений. Пусть матрица системы представлена в виде суммы двух самосопряженных и перестановочных матриц. В результате применения метода переменных направлений с заданным количеством итераций возникают произведения матриц, которые могут быть представлены в виде произведения двух сумм. Доказано, что такое представление существует и единственно. Такое аддитивное представление естественным образом параллелизуется.

### **Существование и устойчивость решений с пограничными и внутренними слоями многомерных сингулярно возмущенных задач реакция – диффузия – адвекция**

*М. А. Давыдова*

Рассматривается многомерная нелинейная краевая задача для эллиптического сингулярно возмущенного уравнения типа реакция – диффузия – адвекция. С использованием известных методов асимптотического анализа [1], [2] исследуются решения погранслоного типа и решения с внутренними переходными слоями (контрастные структуры) путем построения асимптотических разложений этих решений по малому параметру задачи. Положение поверхности перехода, в окрестности которой локализован внутренний слой контрастной структуры, определяется в процессе построения асимптотики решения, причем уравнение поверхности ищется в виде асимптотического разложения по малому параметру. Коэффициенты разложения определяются как решения конечных (случай несбалансированной нелинейности) или дифференциальных (случай сбалансированной нелинейности) уравнений.

Существование решений с построенными асимптотиками и их устойчивость по Ляпунову, как стационарных решений соответствующих параболических задач, доказывается на основе асимптотического метода дифференциальных неравенств [3].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00200).

Список литературы

1. А.Б. Васильева, В.Ф. Бутузов. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. М. : Высш. школа, 1990.
2. А.Б. Васильева, В.Ф. Бутузов, Н.Н. Нефедов. Сингулярно возмущенные задачи с пограничными и внутренними слоями // Труды Математического Института имени В.А. Стеклова, 2010, т. 268, с. 268-283.
3. Н.Н. Нефедов. Метод дифференциальных неравенств для некоторых классов нелинейных сингулярно возмущенных задач с внутренними слоями// Дифференц. уравнения. 1995. Т. 31, №7. С. 1142-1149.

### **Единственность и неединственность решений граничных задач теплопроводности**

*М. Т. Дженалиев, М. М. Амангалиева, М. Т. Космакова, М. И. Рамазанов*

В приложениях часто возникает необходимость решения краевых задач теплопроводности в вырождающихся областях. Это приводит к исследованию особых интегральных уравнений Вольтерра второго рода, когда норма интегрального оператора равна единице.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (код проекта 0823/ГФ4).

Список литературы

1. Ахманова Д.М., Дженалиев М.Т., Рамазанов М.И. Об особом интегральном уравнении Вольтерра второго рода со спектральным// Сиб.мат.журнал. 2011. Т.52, №1. С.3-14.
2. Amangaliyeva M.M., Jenaliyev M.T., Kosmakova M.T., Ramazanov M.I. About Dirichlet boundary value problem for the heat equation in the infinite angular domain// Boundary Value Problems. 2014: 213, 21p. (2014).

### **Adaptive numerical procedures based on the invariant properties of the continuous models**

*S. N. Dimova*

The successful constructing of discrete methods is based on the use of the known qualitative information about the continuous models and their solutions - symmetries, invariant properties, asymptotics. This idea is the basis of the geometric integration (see the monograph [1], the review paper [2] and the references therein), as well as of some moving mesh methods [3]. Adaptive numerical procedures, based on the known invariant properties of the differential problems and on the known regularity and asymptotic behavior of their solutions are presented in this lecture. They are illustrated by examples of quasilinear and semilinear reaction-diffusion problems.

This work is partially supported by the National Science Fund of BMSE under grant I02/9/2014 and by the Science Fund of Sofia University under grant 75/2015.

References

1. Hairer E., Lubich C., Wanner G. Geometric Numerical Integration. Structure-preserving Algorithms for ODE. Springer Verlag, 2002.
2. Budd C.J., Piggott M.D. Geometric integration and its applications, 2001. [Electron. resource]. <http://www.bath.ac.uk/~mascjb/home.html>.
3. Budd S.J., Huang W., Russel R.D. Moving mesh methods for problems with blow-up. // SIAM J. Sci. Comp., 1996. V. 17, iss. 2. P. 305-327.

### **Модифицированный метод коллокаций и наименьших невязок в механике многослойных пластин**

*С. В. Идимешев, С. К. Голушко*

В работе [1] метод коллокаций и наименьших невязок (КНН) [2] применялся для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) анизотропных слоистых пластин. Модифицированный метод КНН основан на применении полиномов высоких степеней, благодаря чему для задач изгиба многослойных прямоугольных пластин удалось представить решение в виде единого полинома (p-подход) и получить решение с высокой точностью при достаточно малых вычислительных затратах.

В настоящей работе поставлена и решена задача изгиба многослойных прямоугольных пластин с ортотропными слоями постоянной толщины. Проведен расчет задач изгиба трех-, пяти-, семи- и девятислойных пластин в рамках различных теорий: классической теории Кирхгоф – Лява, уточненных теорий Тимошенко и ломаной линии [3]. Проведено сравнение результатов, полученных при использовании теорий пластин, с результатами пространственной теории упругости. Проанализировано влияние относительной толщины пластины и количества слоев на вид ее НДС. Для верификации метода проведены расчеты для постановок задач, имеющих известные аналитические решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-12032-офи\_м).

Список литературы

1. Голушко С.К., Идимешев С.В., Шапеев В.П. Разработка и применение метода коллокаций и наименьших невязок к задачам механики анизотропных слоистых пластин // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 5. С. 24–36.



2. Исаев В.И., Шапеев В.П. Развитие метода коллокаций и наименьших квадратов // Труды ИММ УрО РАН. 2008. Т. 14, № 1. С. 41–60.
3. Голушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики композитных пластин и оболочек вращения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 432 с. – ISBN 978-5-9221-0948-2.

### **Томографический метод решения уравнений Максвелла**

*С. Г. Казанцев*

В работе предлагается томографический метод решения краевых задач для уравнений Максвелла. В частности, решается задача восстановления векторного поля по его ротору и дивергенции. Векторное поле в области восстанавливается с помощью интегрального тождества, содержащего граничные значения векторного поля, а также покомпонентное преобразование Радона от ротора и преобразование Радона (скалярное) от дивергенции искомого векторного поля. Для граничных значений получен оператор типа Дирихле – Неймана, в результате решения которого граничные значения векторного поля восстанавливаются полностью. В случае шара решения рассматриваемых задач представляются в виде рядов по базисным векторным полям, которые были построены ранее в работе [1].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00275).

Список литературы

1. Derevtsov E. Yu., Kazantsev S. G., Schuster Th. Polynomial bases for subspaces of vector fields in the unit ball. Method of ridge functions // J. Inverse Ill-Posed Probl. 2007, V. 15, iss 1, P. 19-55.

### **Эффект аналитичности для корректности интегральных уравнений первого рода**

*Г. М. Кененбаева*

В работах П.С.Панкова, Т.М.Иманалиева, Х.С.Сабировой было показано, что некоторые задачи для дифференциальных уравнений, являющиеся некорректными даже с данными бесконечно дифференцируемыми функциями, в том числе начальная задача для уравнения эллиптического типа, становятся корректными с аналитическими функциями.

В докладе это показано для интегрального уравнения первого рода.

Записывается интегральное представление решения начальной задачи для уравнения теплопроводности на числовой оси. Если считать значение решения, как функцию, определенную на числовой оси, в фиксированный момент времени - заданным, а начальную функцию – неизвестной, то возникает линейное интегральное уравнение с разностным ядром.

Показано, что оно является корректным в пространстве целых аналитических функций экспоненциального типа с соответствующей нормой и его решение представляется в виде сходящегося ряда по четным производным заданной функции в правой части.

Результаты подтверждены расчетами на компьютере.

### **О монотонности схемы КАБАРЕ при расчёте многомерных разрывных решений**

*О. А. Ковыркина, В. В. Остапенко*

Для численного моделирования многомерных газодинамических и гидравлических течений широко применяется двухслойная по времени форма записи схемы КАБАРЕ [1], монотонность которой в одномерном случае изучалась в [2], а в многомерном случае – в [3]. Показано, что при стандартной коррекции потоковых переменных, эта схема не гарантирует сохранение монотонности пространственно одномерных разностных решений, что приводит к появлению заметных осцилляций при расчёте двумерных разрывных решений. Предложена модификация двухслойной по времени многомерной схемы КАБАРЕ, которая сохраняет монотонность пространственно одномерных разностных решений и, как следствие, обеспечивает большую гладкость при расчёте многомерных разрывных решений. Приведены результаты двумерных тестовых расчётов, иллюстрирующие преимущества модифицированной схемы.

## Список литературы

1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов // М.: Издательство Московского университета, 2013.
2. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. О монотонности двухслойной по времени схемы Кабаре // Матем. моделирование. 2012. Т. 24. № 9. С. 97-112.
3. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. О монотонности схемы КАБАРЕ в многомерном случае // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 4. С. 1-6.

### **Алгоритмы и технологии распараллеливания решения трехмерных краевых задач на квазиструктурированных сетках**

*В. Д. Корнеев, В. М. Свешников*

Предложены параллельные алгоритмы и технологии решения трехмерных краевых задач методом декомпозиции расчетной области, основанные на прямой конечно-разностной аппроксимации уравнения Пуанкаре – Стеклова на интерфейсе. Решение ищется на адаптивных квазиструктурированных сетках при помощи двухуровневого итерационного процесса. Для балансировки загрузки процессоров подобласти группируются в объединения и строится отображение на вычислительную сеть "одно объединение – один процессор". Рассмотрены параллельные технологии проведения расчетов. Приведены результаты численных экспериментов на согласованных и несогласованных сетках, демонстрирующие ускорение вычислений при распараллеливании.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-11-00485).

### **Numerical upscaling of transient flows in heterogeneous porous media by direction-splitting technique**

*R. D. Lazarov, P. Minev, S. Srinivasan*

We present and discuss two methods for numerical upscaling (see, e.g. [1]) of highly heterogeneous data for parabolic problems in the context of a direction splitting time approximation. The first method is a direct application of the idea of multi-scale finite volume and finite element methods in the context of the direction splitting approach [3]. The second method devises the approximation from the Schur complement corresponding to the interface unknowns of the coarse grid, by applying a proper projection operator to a certain trace space. The spatial discretization employed in this paper is based on a MAC finite volume stencil but the same approach can be implemented within a proper finite element discretization (e.g. [2]). A key feature of the present approach is that it can extend to 3D problems with very little computational overhead. The properties of the resulting approximations are tested numerically on some benchmark coefficient data available in the literature. The paper is based on our report [4].

The project has been partially supported by grants USA NSF DMS-1016525.

## References

1. Efendiev Y., Hou T., Multiscale Finite Element Methods: Theory and Applications, V. 4 of Surveys and Tutorials in the Applied Mathematical Sciences, New York: Springer, 2009.
2. Laevsky, Yu.M., Quadratic elements in splitting methods // Sov. J. Numer. Anal. And Math. Model. 1990. V.5. P. 244—249.
3. Marchuk G.I., Splitting and Alternating Direction Methods, Handbook of Numerical Analysis, Amsterdam: North-Holland, 1990, vol. 1, P. 197—464.
4. Srinivasan S., Lazarov R., Minev P., Multiscale Direction-Splitting Algorithms for Parabolic Equations with Highly Heterogeneous Coefficients, arxiv: 2000:2000, 2015.

### **Неявный численный метод решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений**

*А. Ф. Латыпов, О. В. Попик*

В [1] разработано 4-параметрическое семейство неявных методов решения задачи Коши для систем автономных обыкновенных дифференциальных уравнений, обозначаемых LRM(L,R,M,s),

$L, R, M$  – задаваемые целые числа,  $0.5 \leq s < 1$ , и описаны свойства некоторых из них. Методы основаны на аппроксимации функций правых частей системы на шаге трех точечными интерполяционными полиномами Эрмита. Однако первый в ряду метод, в котором для аппроксимации функций правых частей используются только значения функций, отдельно не представлен и соответственно не изучен. Этот метод рассмотрен в данной работе. Он прост в реализации,  $A$ - и  $L(\delta)$ - устойчив [1], имеет четвертый порядок точности по шагу интегрирования; дан способ вычисления локальной ошибки, пригоден для интегрирования неавтономных уравнений. Приведены решения двух тестовых задач.

Список литературы

1. Латыпов А.Ф., Никуличев Ю.В. Численные методы решения задачи Коши для жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений на основе многосвязных интерполяционных полиномов Эрмита // ЖВММФ. 2007, т. 47, №2, с. 234-244

### **Внутренние переходные слои в решениях краевых задач с разрывными неоднородностями**

*Н. Т. Левашова, Н. Н. Нефедов, А. О. Николаева, А. О. Орлов*

Коллективом авторов исследуется вопрос о существовании решений с внутренними переходными слоями краевых задач для уравнений второго порядка с разрывной правой частью. Краевые задачи в подобной постановке могут быть использованы при математическом моделировании различных физических величин в слоистых полупроводниковых структурах или в окрестностях границ раздела различных сред, например, температуры в приповерхностном слое океана. Исследование таких краевых задач является необходимой составляющей математического моделирования различных физических величин в средах с разрывными характеристиками. Авторами исследованы гладкое решение краевой задачи для уравнения Лапласа и решение задачи на отрезке, претерпевающее скачок производной.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00200).

### **Существование решений с внутренним переходным слоем в системах параболических и эллиптических уравнений**

*А. А. Мельникова, Н. Т. Левашова*

В докладе проводится обзор ряда работ научной группы и приводятся новые результаты по задачам существования решений с внутренним переходным слоем в системах параболических и эллиптических уравнений. Рассматриваемые системы в приложениях носят название "реакция-диффузия" и используются для моделирования процессов в химической кинетике, физике полупроводников, теории активных сред, экологии и других областях.

Приводятся результаты по применению асимптотических методов для решения нелинейных систем с малым параметром [1-3]. Проведенное аналитическое исследование позволило определить условия на реактивные члены систем уравнений, при которых в задачах существуют решения с внутренним переходным слоем, доказать теоремы существования решений такого типа, получить асимптотики решений и определить локализацию переходного слоя.

Полученные результаты могут применяться для выявления различных типов решений в нелинейных системах, совершенствования моделей физических процессов, оптимизации численных алгоритмов.

В ходе исследования разработан алгоритм построения асимптотики для системы с двухмасштабным переходным слоем, проведена модификация асимптотического метода дифференциальных неравенств для случая систем уравнений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-01-00200, 15-01-04619).

Список литературы

1. Бутузов В.Ф., Левашова Н.Т., Мельникова А.А. Контрастная структура типа ступеньки в сингулярно возмущенной системе эллиптических уравнений. //Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2013. Т. 53. № 9. С. 1427-1447.

2. Левашова Н.Т., Мельникова А.А. Контрастная структура типа ступеньки в сингулярно возмущенной системе параболических уравнений. // Дифф. ур. 2015. Т. 51. № 3. С.339–358.

3. Левашова Н.Т., Петровская Е.С. Применение метода дифференциальных неравенств для обоснования асимптотики решения системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений в виде контрастной структуры типа ступеньки // УЗФФ // Ученые записки физического факультета МГУ. 2014. Т. 1. С. 143101–1–143101–13.

### **О применении интегральных уравнений Вольтерра в моделировании развивающихся динамических систем**

*И. Р. Муфтахов, Д. Н. Сидоров, А. Н. Тында*

К настоящему времени разработано достаточно большое количество методов решения классических уравнений Вольтерра 1-го рода. Также известно, что решения интегральных уравнений первого рода могут быть неустойчивыми, и задача их обращения относится к некорректным [2].

В данной работе рассматриваются линейные интегральные уравнения Вольтерра первого рода, ядра которых являются кусочно-непрерывными функциями [1]. Данные уравнения, у которых пределы интегрирования являются функциями времени, находят широкое применение для построения математических моделей, являющихся естественным обобщением моделей развивающихся систем типа В.М. Глушкова. Предлагаются два подхода к численному решению уравнений: первый подход (прямая дискретизация) основан на кусочно-постоянной и кусочно-линейной аппроксимации точного решения (первого и второго порядка точности, соответственно), второй использует предварительное определение двух разгонных значений неизвестной функции и последующем применении специальной регуляризирующей итерационной процедуры.

Список литературы

1. Сидоров Д.Н., Тында А.Н., Муфтахов И.Р. Численное решение интегральных уравнений Вольтерра 1-го рода с кусочно-непрерывными ядрами // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – Т. 3, № 7. – С.107-115.

2. Sidorov D.N. Integral Dynamical Models: Singularities, Signals and Control // World Scientific Publ. Series on Nonlinear Sciences. Series A. – 2014. Vol. 87.

### **О решении интегрального уравнения Гильберта методом регуляризации сдвигом**

*А. Б. Назимов, В. А. Морозов*

В докладе рассматривается сингулярное интегральное уравнение Гильберта нейтрального типа (УГ), главная часть которого суть сингулярный интеграл Гильберта, а регулярная часть – интегральные операторы с разностным и суммарным ядрами.

Исследуется разрешимость УГ в пространстве  $H^l$  методом регуляризации сдвигом. В монографиях [1, 2] исследован вопрос разрешимости УГ и использован метод регуляризации сдвигом при решении дискретного аналога УГ – системы линейных алгебраических уравнений порядка  $N$ . В настоящем докладе метод регуляризации сдвигом использован в исследовании разрешимости УГ в пространстве  $H^l$  и доказаны теоремы сходимости решения регуляризованных сдвигом УГ к соответствующим решениям УГ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 13-01-00096а).

Список литературы

1. Назимов А.Б., Мухамадиев Э.М., Морозов В.А., Муллоджанов М. Метод регуляризации сдвигом. Теория и приложения. Монография. Вологда: ВоГУ, 2012.

2. Назимов А.Б., Менухова Н.О., Муллоджанов М. Сингулярные интегральные уравнения Гильберта нейтрального типа. Теория и алгоритмы. Монография. Вологда: ВоГУ, 2014.

3. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент (в математической физике, аэродинамике, теории упругости и дифракции волн). М.: ТОО "Янус", 1995.

### **Existence and stability of interior and boundary layer solutions of time-periodic reaction-diffusion-advection equations**

*N. N. Nefedov, L. Recke, K. R. Schneider*

In this work we present a further development of our asymptotic comparison principle, applying it for some new important classes of initial boundary value problem for the nonlinear singularly perturbed time

periodic parabolic equations, which are called in applications as reaction-diffusion-advection equations. We illustrate our approach for the new problems with balanced reaction-advection terms. The theorems, which states the existence of the periodic solution with internal layer, gives it's asymptotic approximation and state their Lyapunov stability are proved. The work develops the results of papers [1 - 3].

The project has been partially supported by grants RFBR-DFG N14-01-9133.

#### References

1. Nefedov N. Comparison Principle for Reaction-Diffusion-Advection Problems with Boundary and Internal Layers // Lecture Notes in Computer Science, 2013, 8236, P. 62-72.
2. Vasileva A.B., Butuzov V.F., Nefedov N.N. Singularly Perturbed problems with Boundary and Internal Layers // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics}, 2010, V. 268, P. 258-273.
3. Nefedov N.N., Recke L., Schnieder K.R. Existence and asymptotic stability of periodic solutions with an interior layer of reaction-advection-diffusion equations // J. of Mathematical Analysis and Applications, 2013, P. 90-103.

### **Алгоритм на основе L-устойчивого (4,2)-метода четвертого порядка**

*Е. А. Новиков*

При решении жестких задач широкое распространение получили методы Розенброка [1]. Эти схемы получены из полуявных методов типа Рунге – Кутты, в которых используется одна итерация метода Ньютона, а все остальные проблемы решаются за счет шага. Максимальный порядок точности таких методов с замораживанием матрицы Якоби равен 2, что ограничивает их применение задачами небольшой размерности. В [2] предложен класс  $(m,k)$ -методов, реализация которых тоже проста, но для которых легко решается проблема замораживания. Здесь построен L-устойчивый (4,2)-метод четвертого порядка. Предложен способ линеаризации условий порядка по части коэффициентов. С применением вложенного метода получено неравенство для контроля точности, и сформулирован алгоритм переменного шага. Приведены результаты моделирования кольцевого модулятора.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00047).

#### Список литературы

1. Rosenbrock H.H. Some general implicit processes for the numerical solution of differential equations // Computer. 1963. Vol. 5. P. 329–330.
2. Новиков Е.А., Шитов Ю.А., Шокин Ю.И. Одношаговые безытерационные методы решения жестких систем // ДАН СССР. 1988. Т. 301, №6. С. 1310–1314.

### **О применении схемы КАБАРЕ для расчёта решений гиперболических уравнений в случае знакопеременных характеристических полей**

*В. В. Остапенко, О. А. Ковыркина, Н. А. Зюзина*

Проведен анализ монотонности двухслойной по времени схемы КАБАРЕ [1], аппроксимирующей гиперболические дифференциальные уравнения со знакопеременными характеристическими полями. Получены условия монотонности этой схемы в областях, в которых скорость распространения характеристик имеет постоянный знак [2]. Получены также условия, обеспечивающие монотонность и повышенную точность схемы КАБАРЕ в областях, содержащих линии, на которых скорость распространения характеристик аппроксимируемого уравнения меняет знак. Приведены тестовые расчеты, иллюстрирующие данные свойства схемы КАБАРЕ.

#### Список литературы

1. Головизнин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов // М.: Изд-во МГУ, 2013.
2. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. О монотонности двухслойной по времени схемы Кабаре // Матем. моделирование. 2012. Т. 24. № 9. С. 97-112.

### **Численные методы интегрирования стохастических функционально-дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом и нейтрального типа с порядками сходимости от 1 до 2**

*А. С. Паутов*

Работа посвящена численному интегрированию стохастических функционально-дифференциальных уравнений Ито (СФДУ) с запаздывающим аргументом и нейтрального типа. Работа разви-



вает ранее проведенные исследования [1, 2], в направлении построения методов более высокого порядка. Построены методы интегрирования СФДУ на основе ранее разработанных методов для стохастических дифференциальных уравнений без последствия [3, 4].

Список литературы

1. Паутов А.С. Численное интегрирование стохастических функционально дифференциальных уравнений методом Эйлера // Известия Уральского государственного университета. 2005. № 38. С. 104-121.
2. F. Wu, X.Mao Numerical solutions of neutral stochastic functional differential equations. SIAM Journal on Numerical Analysis, 46 (2008). pp. 1821-1841.
3. Мильштейн Г. Н. Численное интегрирование стохастических дифференциальных уравнений. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1988.
4. Кузнецов Д. Ф. Стохастические дифференциальные уравнения: Теория и практика численного решения. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010.

### **Об одном методе решения трехмерных внешних краевых задач для уравнения Лапласа**

*А. В. Петухов, А. О. Савченко, В. М. Свешников*

Предлагается подход, согласно которому решение трехмерных внешних краевых задач ищется методом декомпозиции расчётной области на две подобласти, сопрягаемые без наложения с условиями типа Нейман – Нейман. Для этого на границе раздела подобластей записывается операторное уравнение, следующее из условия сопряжения для искомой функции, которое аппроксимируется системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на специально введенной сетке. Полученная СЛАУ решается итерационными методами в подпространствах Крылова. При этом на каждой итерации находят решения в подобластях с условием Неймана на границе раздела. Даются примеры численных расчетов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-11-00485).

### **Современное состояние теории и приложений соболевских кубатурных формул**

*М. Д. Рамазанов*

Список литературы

1. Соболев С. Л., Васкевич В. Л. Кубатурные формулы. Новосибирск: Изд-во ИМ СО РАН. 1996.
2. Рамазанов М. Д. Решетчатые кубатурные формулы на изотропных пространствах. Уфа: ИМВЦ УНЦ РАН, 2014, 210 с, ISBN 978-5-906165-50-3.
3. М. Д. Рамазанов, Д. Я. Рахматуллин, Л. З. Валеева, Е. Л. Банникова. Решение интегральных уравнений на многопроцессорных вычислительных системах // Журнал Сибирского Федерального Университета, серия математическая. – Красноярск: СФУ, 2009.– Т. 2, № 1.– С. 69–87.

### **Границы областей решений дифференциальных уравнений при накоплении возмущений**

*А. Н. Рогалев*

Задача Булгакова и накоплении возмущений возникла в связи с проблемой оценки баллистической девиации гироскопа при маневрировании корабля. Для этого был введен показатель качества – максимум модуля выходной величины в заданный момент времени, обеспечивающий, что выходная величина под действием возмущений не превосходит заданных пределов. Исходная постановка распространяется на нахождение максимального отклонения при различных ограничениях на поведение возмущений.

В докладе излагаются новые методы оценивания границ множеств решений дифференциальных уравнений, основанные на символическом представлении решений и вычислении гарантированных границ всех решений с учетом глобальной ошибки [1-3]. Приводятся результаты оценивания решений систем дифференциальных уравнений в задачах накопления возмущений.

## Список литературы

1. Новиков В.А., Рогалев А.Н. Построение сходящихся верхних и нижних оценок решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений //ЖВММФ. 1993. Т.33. № 2. С.219-231.
2. Rogalev A.N. Calculation of Guaranteed Boundaries of Reachable Sets of Controlled Systems. //ISSN 8756-6990, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Allerton Press. 2011.v.47. №3. p.287-296
3. Рогалев А.Н. Гарантированный метод определения устойчивости на конечном интервале времени // Труды Всероссийской конференции “Актуальные проблемы вычислительной математики и математического моделирования”, ИВМ и МГ, Новосибирск, Россия, 12июня - 14 июня 2012 г.. -http: //parbz. sccc.ru/ fcp/ arm2012/pdf/Rogalev.pdf

**Параллельный метод декомпозиции области для решения уравнения Пуассона в нестационарных задачах астрофизики и физики плазмы**

*Н. В. Снытников*

Представлен оптимизированный алгоритм для решения трехмерного уравнения Пуассона в контексте нестационарных задач астрофизики. Алгоритм является развитием метода декомпозиции области с прямым сопряжением подобластей (здесь и далее DDCS) [1] с помощью вычисления потенциала выделенного слоя. На основании сравнительного анализа производительности алгоритма DDCS со стандартным параллельным методом разделения переменных, основанном на многомерном быстром преобразовании Фурье и транспонировании массива данных (здесь и далее FFTT), был разработан новый алгоритм, комбинирующий методы DDCS и FFTT. Реализовано несколько оптимизаций метода, позволивших существенно уменьшить время межпроцессорных коммуникаций. Показано, что данный алгоритм хорошо масштабируется до нескольких тысяч процессорных ядер.

Тестовые эксперименты проводились на суперкомпьютерах ССКЦ, МСКЦ и "Ломоносов" (МГУ).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-31088).

## Список литературы

1. Н.В. Снытников. Параллельный алгоритм для решения 2D-уравнения Пуассона в контексте нестационарных задач // Вычислительные методы и программирование. 2015. 16. P.39-51.

**Finite-dimensional approximation of spectral problems in a Hilbert space**

*S. I. Solov'ev*

We consider the eigenvalue problem for a positive definite bounded symmetric bilinear form with respect to a compact positive symmetric bilinear form in an infinite-dimensional Hilbert space. This problem has a nondecreasing sequence of positive eigenvalues of finite multiplicity with a limit point at infinity, which correspond to complete orthonormal system of eigenelements. The Hilbert space and the two bilinear forms are the data of the problem. The original problem is approximated by a problem in finite-dimensional subspace. We establish new error estimates for the approximate eigenvalues, eigenelements and eigensubspaces via the errors contributed in the data of the problem. The theoretical results are used to derive optimal order estimates for the accuracy of finite element method with numerical integration for differential eigenvalue problems. In this paper we generalize the results of the papers [1, 2].

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (Project nos. 13-01-00908, 14-01-00755, 15-41-02672).

## References

1. Solov'ev S.I. Approximation of sign-indefinite spectral problems // Differential equations. 2012. V. 48. № 7. P. 1028-1041.
2. Solov'ev S.I. Finite element approximation with numerical integration for differential eigenvalue problems // Applied Numerical Mathematics. 2015. V. 93. P. 206-214.

### **Approximation of a nonlinear Sturm – Liouville problem with degenerate coefficients**

*S. I. Solov'ev, P. S. Solov'ev, V. S. Zheltukhin*

We derive the condition of the existence of a minimal eigenvalue corresponding to the positive eigenfunction of a nonlinear eigenvalue problem for an ordinary differential equation with degenerate coefficients. This problem arises in modeling the plasma of radio-frequency discharge at reduced pressures [1]. The initial differential problem is approximated by a scheme of the finite element method on uniform mesh. We investigate the convergence and error of approximate solutions to exact solutions. Theoretical results are illustrated by numerical experiments for a model problem. We do not assume the monotone dependence on the spectral parameter [2].

This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (Project nos. 13-01-00908, 14-01-00755, 15-41-02672).

#### References

1. Zheltukhin V.S., Solov'ev S.I., Solov'ev P.S., Chebakova V.Yu. Computation of the minimum eigenvalue for a nonlinear Sturm – Liouville problem // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2014. V. 35. № 4. P. 416-426.
2. Solov'ev S.I. Approximation of differential eigenvalue problems with a nonlinear dependence on the parameter // Differential equations. 2014. V. 50. № 7. P. 947-954.

### **Обоснование дискретного аналога сопряженно-операторной модели задачи теплопроводности на несогласованных сетках**

*С. Б. Сорокин*

Для сопряженно-операторной модели задачи теплопроводности построена и численно обоснована новая разностная схема на неравномерной несогласованной сетке для переменных (в том числе и разрывных) параметров среды. Построение схемы осуществляется методом опорных операторов. Все компоненты дискретных аналогов векторных величин задаются в одних и тех же узлах сетки. В качестве опорного оператора берется оператор  $-\text{grad } u$ .

Показано, что разностная схема сходится со вторым порядком точности для случаев разрывных параметров среды в законе Фурье и неравномерных несогласованных сеток.

Со вторым порядком сходятся не только скалярные сеточные функции (приближения к температуре), но и сеточные вектор-функции (приближения к потоку тепла).

### **Многосеточный алгоритм решения сингулярно возмущенной задачи**

*С. В. Тиховская*

Рассматривается двумерная линейная эллиптическая задача с регулярными пограничными слоями. Для решения используется схема направленных разностей на сетке Шишкина [1], обладающая свойством равномерной сходимости по малому параметру. Известно, что применение многосеточного метода приводит к существенному сокращению количества арифметических действий. В [2] исследован двухсеточный метод с использованием экстраполяции Ричардсона для повышения точности разностного решения и показано, что в случае вспомогательной сетки с числом узлов вдвое меньшим, чем у исходной, приводит к повышению точности на порядок. В работе исследуется многосеточный алгоритм такой же структуры и для простоты сравнения используется дополнительно только ещё одна вспомогательная сетка с числом узлов в четыре раза меньше, чем у исходной. Применение экстраполяции Ричардсона с использованием значений со всех сеток позволяет повысить точность исходной схемы на два порядка.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-06584).

#### Список литературы

1. Шишкин Г.И. Сеточные аппроксимации сингулярно возмущенных эллиптических и параболических уравнений. Екатеринбург: УрО РАН, 1992.
2. Тиховская С.В. Двухсеточный метод для эллиптического уравнения с пограничными слоями на сетке Шишкина // Учен. зап. Казан. ун-та. Серия Физ.-матем. науки 2012. Т. 15, кн. 4. С.49–56.

**О решении с помощью МКЭ эллиптической задачи с сильным вырождением***М. В. Урев, К. В. Бродт*

Рассматриваются вопросы численного решения методом конечных элементов (МКЭ) первой краевой задачи для эллиптического уравнения с вырождением на части границы. В соответствующих задаче функциональных пространствах с "согласованными весами" рассмотрены слабая и сильная вариационные постановки. По сравнению с [1] получены более сильные результаты относительно регулярности решения. При отрицательном значении параметра в уравнении доказана Фредгольмова разрешимость задачи. Используя прием мультипликативного выделения особенности [2] для МКЭ с использованием кусочно-линейных элементов доказана сходимость в весовой норме приближенного решения к точному с оценкой не хуже, чем в случае эллиптического уравнения без вырождения. Приведены результаты численных экспериментов, подтверждающих теоретические результаты.

Список литературы

1. Урев М.В. Сходимость МКЭ для эллиптического уравнения с сильным вырождением. // Сиб. журн. индустр. математики. 2014. Т.17, \№2(58). С.137-148.
2. Тимербаев М.Р. Мультипликативное выделение особенности в схемах МКЭ для эллиптических вырождающихся уравнений. // Дифф. уравнения. 2000. Т.36, \№7. С.979-985.

**Моделирование больших деформаций гиперупругих тел МКЭ***Л. Р. Фахрутдинов, Л. У. Султанов*

В работе приведена методика исследования гиперупругих тел, использующихся для определения конечных деформаций нелинейно упругих материалов. Дана кинематика движения среды. Деформация и скорость деформации описаны с использованием: тензора градиента деформации, меры Фингера (левый тензор Коши – Грина), тензора пространственного градиента скорости, тензора деформации скорости. Напряженное состояние описывается при помощи тензора истинных напряжений Коши – Эйлера, определенного в актуальном состоянии.

Рассмотрен пример получения линеаризованных физических соотношений для материала, описываемого потенциалом Муни – Ривлина. Численная реализация основана на методе конечных элементов на базе восьмиузлового полилинейного элемента. Для проверки работоспособности методики решен ряд задач. Полученные в ходе решения результаты не противоречат опубликованным ранее.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-31-20602, 15-41-02557).

**Апостериорные оценки точности приближённых решений в двумерных задачах классической и моментной теории упругости***М. Е. Фролов, С. И. Репин*

Работа посвящена функциональному подходу к построению апостериорных оценок для плоских задач в классической теории упругости [1], [2] и теории Коссера [3]. Представленные мажоранты ошибки контролируют точность конформных приближенных решений, а входящие в них свободные элементы допускают использование аппроксимаций, характерных для смешанных МКЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00162-а и 14-01-31273-мол\_а).

Список литературы

1. Repin S. A posteriori estimates for partial differential equations. Berlin: de Gruyter, 2008.
2. Mali O., Neittaanmäki P., Repin S. Accuracy Verification Methods. Theory and algorithms. Computational Methods in Applied Sciences. Vol. 32. Springer, 2014.
3. Фролов М.Е. Функциональные апостериорные оценки погрешности решений плоских задач в теории упругости Коссера // ПММ. 2014. Т. 78, № 4. С. 595-603.

## Секция 2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ АЛГЕБРА И МЕТОДЫ АППРОКСИМАЦИИ

### Анализ и планирование ремонтов автомобильных дорог с использованием информационно-вычислительных технологий обработки больших объемов данных лазерных измерений

*Б. М. Шумилов, Ж. Абдыкалык кызы*

В работе представлена система мультивейвлетов Эрмита произвольной нечетной степени, удовлетворяющих условиям ортогональности многочленам той же степени. Рассматривается построение и обращение блока фильтров в задачах обработки регулярных сигналов и двумерных полей. Обосновывается новый подход к вычислению мультивейвлет-преобразования на основе алгоритма решения систем линейных алгебраических уравнений с блочно-трехдиагональной матрицей методом матричной прогонки. Представлены результаты численных экспериментов для мультивейвлетов пятой степени. Описаны проблемы моделирования поверхностей автомобильных дорог с использованием данных лазерного сканирования. Предлагается алгоритм обнаружения трещин и повреждений дорожного полотна, основанный на вейвлет-преобразовании Эрмита. Показаны примеры наложения спроектированной дороги на предварительно обработанные лазерные измерения. Числа и графики, следующие из экспериментов, показывают, что вейвлет-преобразование Эрмита – мощный инструмент анализа и планирования ремонтов автомобильных дорог с использованием информационно-вычислительных технологий обработки больших объемов данных лазерных измерений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-38-50423 мол\_нр).

Список литературы

1. Турсунов Д. А., Шумилов Б. М., Байгулов А. Н., Колупаева С. Н. Предварительная обработка материалов лазерного сканирования автомобильных дорог // Вестник ТГАСУ. 2011. № 3 (32). С. 184-191.
2. Бекмуратов А. Т., Онопенко Г. А., Кудуев А. Ж., Шумилов Б. М., Эшаров Э.А. Вейвлет-преобразование и сжатие данных лазерного сканирования автомобильных дорог // Вестник ТГАСУ. 2011. № 4 (33). С. 228-238.
3. Кудуев А. Ж., Лаходынова Н. В., Шумилов Б. М., Эшаров Э. А. Вариационное трассирование автомобильных дорог с помощью нового типа эрмитовых кубических сплайн-вейвлетов // Вестник ТГАСУ. 2011. № 3 (32). С. 176-183.
4. Шумилов Б.М. Мультивейвлеты эрмитовых сплайнов третьей степени, ортогональные кубическим многочленам // Математическое моделирование. 2013. № 4. С. 17-28.
5. Шумилов Б.М., Байгулов А.Н., Абдыкалык кызы Ж. Алгоритм и программа вейвлет-моделирования поверхностей автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 1 (42). С. 142-152.
6. Шумилов Б.М. Алгоритм матричной прогонки вычисления мультивейвлетов нечетной степени, ортогональных многочленам // Автометрия. 2015. Т. 51. № 2. С. 83-92.

### Ускорение многократного решения СЛАУ с изменяющейся матрицей

*Р. Р. Ахунов, С. П. Куксенко, Т. Т. Газизов*

Рассмотрена задача ускорения многократного решения СЛАУ. Примером такой задачи является вычисления емкостных матриц полосковых структур при изменении их параметров [1]. Значения элементов матриц отличаются несущественно от матрицы к матрице, сами элементы расположены в произвольных местах, что делает предпочтительным использование итерационных методов с предобусловливателем, полученным при решении первой СЛАУ [1]. Однако эффективность предобусловливателя снижается при увеличении разницы между первой и очередной матрицами [2]. Для решения этой проблемы в [2] предложено переформировывать предобусловливатель по порогу числа итераций, однако определить оптимальный порог, при котором обеспечивается максимальное



ускорение, априори не представляется возможным. В данной работе предложены алгоритмы, позволяющие адаптивно переформировывать матрицу предобусловливателя. Проведены вычислительные эксперименты при значительном изменении элементов матриц СЛАУ для вычислений ряда емкостных матриц. Полученные ускорения близки к оптимальным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-01232), Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-07-31267 и 14-29-09254), а также в рамках выполнения гос. задания №8.1802.2014/К Минобрнауки России.

Список литературы

1. Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Ускорение многократного решения СЛАУ итерационным методом при вычислении емкости микрополосковой линии в широком диапазоне изменения ее размеров // Численные методы и вопросы организации вычислений. XXVII // Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН, 2014. Т. 428, С. 32–41.

2. Ахунов Р.Р., Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Многократное решение СЛАУ итерационным методом с переформированием матрицы предобусловливания // Численные методы и вопросы организации вычислений. XXVII // Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН, 2014. Т. 428, С. 42–48.

### **Об условиях формосохранения при интерполяции нелокальными параболическими сплайнами класса $C^1$**

*В. В. Богданов*

При интерполяции функций, заданных своими значениями в узлах некоторой сетки, возникает естественный вопрос: будет ли интерполирующая функция наследовать геометрические свойства дискретных данных, и если будет, то в каком смысле и при каких условиях. Ранее для наиболее популярных и востребованных практикой конструкций классических кубических сплайнов класса  $C^2$  в этом направлении проведено достаточно полное исследование, начало которому было положено В. Л. Мирошниченко в первой половине 80-х годов. Им были получены удивительно простые и в то же время довольно ёмкие достаточные условия монотонности и выпуклости, выраженные в виде ограничений на разделённые разности от интерполируемой функции.

В дальнейшем задачу интерполяции, обладающую свойством формосохранения, стали называть задачей  $k$ -монотонной интерполяции, полагая  $k=0$ , если требовалось гарантировать сохранение знакопостоянства данных, причём определенного знака, или полагая  $k=1$ , если требовалось сохранение монотонности данных определенного направления, и т. д.

Для классических кубических сплайнов метод Мирошниченко реализован максимально полно. Однако вопрос сохранения интерполянтом формы данных для произвольных функций, так чтобы на участках определенности формы данных (как то: возрастание или, наоборот, убывание; выпуклость вниз или, наоборот, вверх) кусочно наследовались соответствующие свойства, потребовал существенной модификации этого подхода. Идею такой модификации в середине 90-х годов предложил Ю. С. Завьялов. Задачу интерполяции с кусочным сохранением формы данных стали называть  $k$ -комонотонной интерполяцией, здесь приставка "ко" характеризует формосохранение на участках определенности геометрической формы данных, соответствующей, как и выше, различным  $k$ .

Метод Мирошниченко позволил ему решить и вопрос описания условий формосохранения для довольно капризных (с точки зрения произвольности интерполяционных условий и условий гладкости интерполянта) нелокальных параболических сплайнов класса  $C^1$ . А именно, им получены достаточные условия сохранения интерполянтом монотонности или выпуклости данных. Продвигая его идею, Ю. С. Волков и В. Т. Шевалдин получили полное описание достаточных по Мирошниченко условий  $k$ -монотонной интерполяции нелокальными параболическими сплайнами, построенными как по методике Ю. Н. Субботина, так и по методике М. Марсдена. При этом использовалось предложенное ранее Ю. С. Волковым оригинальное представление сплайна в разложении некоторой его производной по базису из  $B$ -сплайнов меньшей степени.

Вопросу  $k$ -комонотонной интерполяции произвольных данных нелокальными параболическими сплайнами класса  $C^1$  посвящена данная работа.

### **Сплайн-моделирование при определении основных параметров гидротурбин**

*Ю. С. Волков, В. Л. Мирошниченко, А. Е. Салиенко*

Рассматривается методика построения моделей универсальных характеристик модельных гидротурбин, необходимых при проектировании натуральных гидротурбин. Стендовые испытания модельных гидротурбин позволяют получить энергетические, кавитационные и другие характеристики турбин, выражающие зависимости КПД, кавитационного коэффициента и других величин на различных режимах работы от основных параметров таких, как диаметр рабочего колеса, частота вращения, расход воды и напор. Строится сплайн-аппроксимация данных, представляющих хаотический набор, задающая математическую модель таких зависимостей (универсальная характеристика), являющейся основой расчёта основных параметров натурной гидроэлектростанции.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-07-07530).

### **Библиотека Krylov: возможности и области применения**

*В. С. Гладких, Я. Л. Гурьева, Д. В. Перевозкин, А. В. Петухов, И. Н. Скопин*

Работа содержит описание функциональных возможностей, областей применения и особенностей программной реализации библиотеки параллельных алгоритмов Krylov. Библиотека ориентирована на решение больших систем линейных алгебраических уравнений с разреженными симметричными и несимметричными матрицами (положительно определенными и знаконеопределенными). Такие матрицы получаются при сеточных аппроксимациях многомерных краевых задач для систем дифференциальных уравнений на неструктурированных сетках. Библиотека включает двухуровневые итерационные методы в подпространствах Крылова, предобуславливание которых осуществляется на основе сбалансированной декомпозиции расчетной области с различными размерами пересечений подобластей. Программные реализации выполнены с использованием типовых сжатых разреженных форматов матричных данных. Приводятся результаты численных экспериментов с демонстрацией эффективности распараллеливания для характерных плохо обусловленных задач. Также представлены результаты сравнения с аналогичными всемирно известными пакетами. Базовые методы, реализованные в решателях библиотеки, представлены в публикациях [1, 2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-11-00485 "Высокопроизводительные методы и технологии моделирования электрофизических процессов и устройств").

Список литературы

1. Бутюгин Д.С., Ильин В.П., Перевозкин Д.В. Методы параллельного решения СЛАУ на системах с распределенной памятью в библиотеке Krylov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2012. Т. 47. № 306. С. 22–36.

2. Бутюгин Д.С., Гурьева Я.Л., Ильин В.П., Перевозкин Д.В., Петухов А.В., Скопин И.Н. Функциональность и технологии алгебраических решателей в библиотеке Krylov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2013. Т. 2. № 3. С. 92–105.

### **Acceleration of DDM: Approaches, parallel realization and numerical experiments**

*Y. L. Gurieva*

Parallel realization of DDM is investigated numerically for one particular 2D problem. Data structures for the effective inter-subdomain communications are presented. Two-level iterative process has been proposed: the outer iterations are carried out according to BiCGStab method, while inner solver in a particular subdomain is PARDISO from Intel MKL. Different ways to reduce the total time of the solving process are under consideration: domain decomposition with intersections of the subdomains, Dirichlet – Neumann condition on the subdomain boundaries, aggregation approach. Some results of numerical experiments are presented and discussed.

The project has been partially supported by Russian Science Foundation grant N~14-11-00485. The experimental part of the work is supported by the RFBR grant N~14-07-00128.

## **О некоторых особенностях равномерной дискретизации и дифференциальной аппроксимации**

*А. О. Егоршин*

Обобщенная дискретизация (Д) дифференциального уравнения (ДУ) есть получение разностного уравнения (РУ), описывающего значения (обобщенные отсчеты) некоторой последовательности функционалов на решениях данного ДУ. Частный случай таких функционалов есть отсчеты решений ДУ на некоторой  $h$ -сетке.

Дифференциальная аппроксимация (ДА) есть задача, обратная Д: получить ДУ, отсчеты решения которого на определенной сетке описываются заданным РУ.

Точные взаимные равномерные (для всего интервала определения) решения этих задач существуют (при определенных условиях) лишь для одного класса ДУ и РУ: это линейные однородные уравнения с постоянными коэффициентами. Для этого класса уравнений имеются аналитические нелинейные формулы равномерной Д и ДА.

Это экспоненциальные (Д) и логарифмические (ДА) функции. Вычисления по этим формулам могут быть осуществлены с помощью их  $L$ -приближений матричными многочленами Тейлора (порядка  $L$ ).

В докладе предложены два подхода к равномерной Д и ДА: аппроксимационный и вариационный. Первый основан на  $L$ -приближениях решений ДУ на сетке, второй основан на решениях соответствующих вариационных задач идентификации ДУ по отсчетам его решений на этой сетке. Для некоторых случаев показана эквивалентность этих подходов аналитическому.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13 01 00329).

Список литературы

1. Егоршин А.О. Идентификация и дискретизация линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика, 2014, том 14, выпуск 3, С. 29-42.

## **Cluster kernels based on Intel® MKL Poisson Solver**

*М. Zhukova, A. Kalinkin*

The Helmholtz equation plays an important role in mathematical models of various physical processes. Intel® Math Kernel Library (Intel® MKL) Poisson solver was developed for 2D and 3D Helmholtz problems in Cartesian and spherical coordinates with three kinds of boundary conditions. One of the disadvantages of the existing solver is that the scalability of the solution time is limited by the number of OpenMP threads used. Another issue is related to the amount of memory required. Finally, the solver was designed only for shared-memory architectures which can be a significant constraint for large-scale applications.

To address these difficulties, an extension of the Poisson solver was implemented using a hybrid of MPI and OpenMP parallelization. This paper is a logical continuation of the previous works [1], [2].

In this paper two approaches are proposed for parallelization. Both of them are based on 1D Fourier transforms combined with a tridiagonal matrix algorithm similar to the existing Poisson solver implementation. 2D decomposition is used to distribute the data among MPI processes. As a result, it is necessary to perform data exchanges (using the MPI\_Alltoall command) between steps of the algorithm. The resulting parallel implementation is the first approach. The second approach is proposed to reduce data transfer overhead before and after the tridiagonal solve step. The reduction is achieved using a modification of the distributed tridiagonal matrix algorithm [3].

The performance results obtained are demonstrated for both implementations and compared to the performance results for the existing solver. A chart demonstrating speed-up vs. the existing Intel MKL Poisson solver is presented for the proposed parallel implementations. Scalability up to 64 MPI processes of the parallel algorithms is tested on the Helmholtz problem for meshes with 10243 and 204833 points. The results obtained show almost linear scalability and significant improvement over existing Intel MKL Poisson solver. Based on the results obtained, we conclude that the proposed hybrid implementations can

solve large-scale problems efficiently in terms of performance and memory usage benefiting from modern multicore and manycore architectures.

References:

1. A. A. Kalinkin, Y.M. Laevsky, S.V. Gololobov, 2D Fast Poisson Solver for High-Performance Computing, In Proceedings of the 10th International Conference on Parallel Computing Technologies (PaCT '09), Victor Malyskin (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 112-120.

2. A. Kalinkin, A. Kuzmin. Intel® MKL Poisson Library for scalable and efficient solution of elliptic problems with separable variables, Parallel Computation Technologies (PCT '12), ISBN: 978-5-696-04237-4, 336-341.

3. A. N. Konovalov, A. N. Bugrov, V. V. Elinov, Algorithm of Parallel Solution for Grid Problems, Modern Problems of Computational and Applied Mathematics, Novosibirsk (1979) (in Russian).

### **Вычислительные эксперименты по сопоставлению эффективности LU-обновлений в алгоритмах симплекс-метода**

*Г. И. Забияко*

Надежность и эффективность модифицированного симплекс-метода существенно зависит от способа обновления LU-разложений на итерациях метода. Алгоритмы обновления различаются по устойчивости, сложности реализации, возможности векторизации вычислений на современных вычислительных системах. На основе решения тестовых задач проводится сравнительный анализ алгоритмов обновления LU-разложений.

### **Двумерная интерполяция функций с большими градиентами в пограничном слое**

*А. И. Задорин*

В данной работе исследуется вопрос интерполяции функции двух переменных, представимой в виде суммы регулярной составляющей с ограниченными производными до некоторого порядка и двух погранслойных составляющих (по каждой переменной), известных с точностью до множителя. Предполагается, что погранслойная составляющая является функцией одной переменной общего вида, производные которой не являются равномерно ограниченными. Такое представление имеет решение сингулярно возмущенной эллиптической задачи. Применение полиномиальных интерполяционных формул может приводить к неприемлемым погрешностям. В [1] для функции одной переменной с погранслойной составляющей построена интерполяционная формула с произвольно заданным числом узлов интерполяции, точная на погранслойной составляющей. В данной работе формула из [1] обобщена на двумерный случай. Получена оценка погрешности, равномерная по погранслойным составляющим и их производным. Показано, что построенная формула может быть применена в двухсеточном алгоритме решения эллиптической задачи с пограничными слоями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-06584).

Список литературы

1. Zadorin A.I., Zadorin N.A. Interpolation formula for functions with a boundary layer component and its application to derivatives calculation // Siberian Electronic Mathematical Reports. 2012. V. 9. P. 445-455.

### **Dynamic parallelization in successive bandwidth reduction approach for the reduction of a symmetric matrix to tridiagonal form**

*А. А. Зоткевич, Н. С. Моцартова, С. В. Кузнецов*

In the talk a new dynamic parallelization for the reduction of a band matrix to tridiagonal form is considered. We present some details of implemented optimizations: dynamic parallelization of eigenvectors computations, speculative computations in QR, dynamic parallelization of the reduction of banded matrix to tridiagonal form and how these techniques are combined for achieving high performance.

## **О современных параллельных методах и технологиях решения сверхбольших СЛАУ**

*В. П. Ильин*

Рассматриваются современные походы к построению параллельных прямых и итерационных методов решения сверхбольших систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженными матрицами, получаемыми при аппроксимациях многомерных задач на неструктурированных сетках в ограниченных или неограниченных областях. В последнем случае дополнительно привлекается интегральное представление искомого решения. В ряде актуальных приложений исследуемые СЛАУ представляются в виде матричных уравнений Сильвестра или Ляпунова. Основой высокопроизводительных алгоритмов являются: автоматизированная сеточная декомпозиция с параметризованным пересечением подобластей, аддитивный метод Шварца с различными интерфейсными условиями на внутренних границах, блочные итерационные процессы в полиномиальных или рациональных подпространствах Крылова с динамическим мультипредобуславливанием, ускоряющие процедуры на базе грубосеточной коррекции, агрегирования и малоранговой аппроксимации матриц, а также двухуровневое распараллеливание на гетерогенных вычислительных архитектурах средствами гибридного программирования с распределенной и общей памятью. Эффективность описанных принципов демонстрируется результатами презентативных экспериментов для алгоритмов, реализованных в составе библиотеки алгебраических решателей KRYLOV.

## **Параллельные мультипредобусловленные методы полусопряженных направлений**

*В. П. Ильин, Д. В. Перевозкин*

Предлагается новое семейство параллельных итерационных алгоритмов полусопряженных направлений с динамическим мультипредобуславливанием для решения больших систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с несимметричными разреженными матрицами, возникающими при аппроксимациях многомерных краевых задач на неструктурированных сетках. Рассматриваемые методы в подпространствах Крылова применяются к ускорению двухуровневых итерационных процессов на основе вариантов аддитивного метода Шварца с грубосеточной коррекцией. Программная реализация методов нацелена на использование высокопроизводительных вычислительных систем средствами MPI и OpenMP. Эффективность разработанных методов демонстрируется результатами численных экспериментов на представительной серии методических задач.

## **О некоторых особенностях решения стационарного уравнения конвекции – диффузии – реакции**

*Б. Л. Крукиер*

Одна из трудностей решения задачи КД связана с различным масштабом процессов диффузии и конвекции, который определяется числом Пекле. Его стремление к нулю приводит к неограниченному росту производной и при несогласованности краевых условий с правой частью, порождает сингулярно возмущенную задачу.

В [1, 2] было показано, что, получаемые в результате центрально-разностной аппроксимации уравнения конвекции – диффузии СЛАУ, обладают рядом не очень хороших свойств при доминировании конвекции. Это и потеря свойства диагонального преобладания для матрицы системы, очень важная для сходимости итерационных методов, и сильная несимметрия системы, т.е. преобладание нормы кососимметричной части матрицы над нормой симметричной ее части. Вместе с тем, использование при аппроксимации конвективных членов разностей “против потока” приводит к системам с M-матрицами, что хорошо для итерационных методов (сохраняется свойство диагонального преобладания). Однако, использование этих схем сильно размывает численное решение за счет схемной вязкости, что при больших числах Пекле недопустимо, т.к в этом случае численная схемная вязкость превышает физическую [3]. Точки области расчета (точки стагнации), где коэффициенты дифференциального уравнения обращаются в ноль, также создают проблемы при решении задачи. Появление в уравнении КДР члена реакции со закононеопределенным коэффициентом не упрощает его



решение, т.к. может привести к необходимости решать знаконеопределенности СЛАУ. Для решения этой проблемы можно использовать результаты из [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00441-а, 15-51-53066, 14-01-31076).

Список литературы

1. Krukier L.A., Martinova T.S., Bai Z.Z. Product-Type Skew-Hermitian Triangular Splitting Iteration Methods for Strongly Non-Hermitian Positive Definite Linear Systems // Journal of Computational and Applied Mathematics - 2009. - V.232, N1. - P.3-16
2. Krukier L.A., Pichugina O.A., Krukier B.L. Numerical solution of the steady convection-diffusion equation with dominant convection // Procedia Computer Science - 2013. - V. 18. - P.2095-2100J.
3. Zhang, Preconditioned iterative methods and finite difference schemes for convection-diffusion // Appl. Math. \& Comp. -2000. - V.109. - P.11-30
4. Krukier B.L., Krukier L.A. Using the Skew-Symmetric Iterative Methods for Solution of an Indefinite Nonsymmetric Linear Systems // J. Comp. Math. - 2014. - V. 32, N.3. - P. 266-271.

### **Итерационные методы решения стационарного уравнения конвекции – диффузии в сжимаемой и несжимаемой среде**

*Л. А. Крукиер*

Эффективное решение стационарных уравнений конвекции – диффузии (КД) является основной проблемой большой группы очень важных задач математического моделирования в различных областях науки и практики. Для их исследования привлекаются различные численные методы. После конечно-разностной, конечно-элементной или конечно-объемной аппроксимации дифференциального оператора по пространству мы получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Основной особенностью этой задачи, является несимметрия получаемых матриц и, в общем случае, их знаконеопределенность [1]

Решение уравнения КД в сжимаемой или несжимаемой среде имеет в каждом случае свои особенности. Так для несжимаемой среды все три формы [2] записи уравнения КД эквивалентны, в случае сжимаемости среды это не так. Но в этом случае удается свести исходную задачу КД к задаче конвекции – диффузии – реакции (КДР) с коэффициентом реакции меняющим знак. В работе рассмотрено поведение итерационных методов в этом случае.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00441-а, 15-51-53066).

Список литературы

1. Вабищевич П.Н., Васильева М.В. Явно-неявные схемы для задач конвекции – диффузии – реакции // Сиб. ж. выч. мат. - 2012. – т. 15, №4. С. 359-369.
2. Крукиер Л.А., Мартынова Т.С. Optimization methods of parallel execution of numerical programs in the LuNA fragmented programming system // ЖВМ и МФ. - 1999 - Т. 39, N. 11. - С.1821-1827

### **Эффективные предобусловливатели для решения систем линейных алгебраических уравнений с сильно несимметричной матрицей**

*Л. А. Крукиер, Т. С. Мартынова*

Исследован класс предобусловливателей для решения систем линейных алгебраических уравнений с сильно несимметричной положительно определенной матрицей, построенный на основе симметричного / кососимметричного расщепления матрицы системы. Доказаны теоремы о локализации спектра предобусловленной матрицы и об асимптотической скорости сходимости предобусловленного метода GMRES. Показано, что использование предложенных предобусловливателей эффективно при итерационном решении систем линейных алгебраических уравнений методами GMRES и BCG[1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 150100441а, 155153066ГФЕНа) и Минобрнауки РФ (гос. задание ВУЗов, базовая часть).

Список литературы

1. Саад Ю. Итерационные методы для разреженных линейных систем. Москва: Изд-во Московского университета, 2013.

### **Развитие теории сплайн-вейвлетов и оптимизация алгоритмов обработки числовой информации**

*А. Ж. Кудуев, Б. М. Шумилов*

В работе исследован неявный метод разложения эрмитовых сплайнов 7-й степени на серию "ленивых" вейвлетов со смещенными носителями. Обосновано расщепление алгоритма вейвлет-преобразования на параллельное решение четырех пятидиагональных систем линейных уравнений со строгим диагональным преобладанием. Представлены результаты численных экспериментов по точности на многочленах и сжатию сплайн-вейвлет разложений. Обсуждаются способы вычисления производных, необходимых в преобразовании вейвлет-Эрмита. Делается вывод о том, что конструкции, использующие производные высоких порядков, применимы для итерационного решения нелинейных дифференциальных уравнений по схеме метода конечных элементов. Ставятся задачи распространения предложенных в статье неявных соотношений разложения на случаи: а) "ленивых" эрмитовых сплайн-вейвлетов 11-й степени; б) вейвлетов 7-й степени, полуортогональных с производными второго порядка; в) вейвлетов 7-й степени, ортогональных многочленам, со смещенными носителями; г) минимальных вейвлетов типа Рябенского – Демьяновича 3-й степени с разделенными разностями первого порядка.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-31-50383 мол\_нр).

Список литературы

1. Шумилов Б.М., Матанов Ш.М. Алгоритм с расщеплением вейвлет-преобразования сплайнов первой степени // Вестник Томского государственного университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 3. С. 51-57.

2. Шумилов Б.М. "Ленивые" вейвлеты эрмитовых кубических сплайнов и алгоритм с расщеплением // Вестник Томского государственного университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 1. С. 64-72.

3. Шумилов Б.М., Эшаров Э.А., Кудуев А.Ж., Ыманов У.С. Мультивейвлет пятой степени // Известия ТПУ. Математика и механика. Физика. 2013. Т. 323, № 2. С. 11-15.

4. Шумилов Б.М. Алгоритм с расщеплением вейвлет-преобразования эрмитовых кубических сплайнов // Вестник Томского государственного университета. Сер. Математика. Механика. 2010. № 4. С. 45-55.

5. Турсунов Д.А., Кудуев А.Ж., Турсунов Э.А., Шумилов Б.М. Мультивейвлеты седьмой степени, ортогональные с производными второго порядка // Вестник Омского государственного университета. 2012. № 3. Вып. 3. С. 147-152.

6. Шумилов Б.М. Кубические мультивейвлеты, ортогональные многочленам, и алгоритм с расщеплением // Сибирский журнал вычислительной математики. 2013. № 3. С. 283-297.

### **Взаимное размещение многоугольников на плоскости**

*А. И. Куликов*

В работе рассматриваются две задачи размещения двух простых многоугольников, один из которых неподвижен, а другой может перемещаться путём параллельного переноса и вращения.

Первая задача заключается в том, чтобы найти все возможные положения подвижного многоугольника, при которых он находится внутри неподвижного, касаясь его по крайней мере в двух точках. Получено явное аналитическое решение этой задачи.

Вторая задача состоит в том, что при заданном перемещении подвижного многоугольника необходимо определить, находится ли он внутри неподвижного. Для случая, когда неподвижный многоугольник выпуклый, получено явное аналитическое решение.

С целью оптимизации в обеих задачах используется аппарат предвычислений. Определение, находится ли один многоугольник внутри другого, выполняется за логарифмическое время.

Эти алгоритмы могут использоваться при навигации и проверке столкновений, в компьютерных играх, программных тренажерах.

Список литературы

1. Luis Barba, Stefan Langerman. Optimal detection of intersections between convex polyhedral, 2014.
2. Куликов А.И. Некоторые задачи вычислительной геометрии. Изогеометрическое сглаживание и геометрический поиск. International Conference Graphicon, Novosibirsk Akademgorodok, 2005.

### **Локальные алгоритмы гладкой аппроксимации с сохранением геометрической формы, основанные на полиномах четвертой степени**

*А. И. Куликов, А. А. Копылов*

Для локальной гладкой аппроксимации на плоскости и в пространстве предложен метод, основанный на использовании полиномов четвертой степени с изогеометрическими свойствами.

Для плоского случая аппроксимирующие функции получаются линейными преобразованиями базового сплайна – полинома четвертой степени и имеют явное аналитическое представление. Такое построение не дает осцилляций. При изменении шага аппроксимирующая кривая сохраняет свойства. В плоском случае в условиях невырожденности и однозначности данные преобразования сохраняют выпуклость и монотонность. Этот алгоритм допускает распараллеливание.

При построении аппроксимирующей поверхности используется метод, предложенный для плоского случая, при котором сначала строятся сплайны по одной координате, а потом по другой. Предложены критерии выпуклости поверхности в окрестности узла сетки.

Список литературы

1. Квасов Б.И. Методы изогеометрической аппроксимации сплайнами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
2. Куликов А.И. Визуализация геофизической информации. International Conference Graphicon, Nizhny Novgorod, 2002.

### **Conjugate gradient acceleration of iterated edge-preserving smoothing filters**

*N. Malyshev, A. Knyazev*

We propose acceleration of iterated versions of edge-preserving smoothing filters by running them through a conjugate gradient method, without deteriorating their quality. The filter non-linearity is dealt with by careful restarting and freezing. Our initial numerical experiments demonstrate 20x acceleration of the classical bilateral filter and 3x acceleration of the recently developed guided filter.

### **Обратная задача аппроксимации функций**

*О. А. Махоткин*

Прямая задача аппроксимации функций состоит в замене сложной функции более простой, например, кусочно-постоянной. В математической статистике возникает обратная задача – найти функции, имеющие одинаковые кусочно-постоянные приближения. В докладе приводятся результаты как теоретического анализа задачи, так и проведенных компьютерных экспериментов.

### **Кубатурные формулы на сфере, инвариантные относительно группы диэдра D4h**

*А. С. Попов*

Описывается алгоритм поиска наилучших (в некотором смысле) кубатурных формул на сфере, инвариантных относительно группы вращений диэдра с инверсией D4h. Проведены расчёты по этому алгоритму с целью определить параметры всех наилучших кубатурных формул данной группы симметрии до 29-го порядка точности. При этом для всех формул до 9-го порядка точности были найдены точные значения параметров соответствующих кубатур, а для остальных формул – приближённые, полученные путём численного решения систем нелинейных алгебраических уравнений методом ньютоновского типа.

### **О сглаживании кубическими сплайнами**

*C. С. Примаков*

В докладе рассказывается об алгоритмах построения сглаживающих кубических сплайнов. С целью решить проблему обнуления вторых производных на концах отрезка сглаживания при использовании натуральных сплайнов используются краевые условия not-a-knot и модифицированные алгоритмы построения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-07-07530 А).

### **Intel® Math Kernel Library inspector-executor Sparse BLAS API for iterative computations**

*S. G. Pudov*

The implementation of Sparse BLAS functionality in the Intel® Math Kernel Library (Intel® MKL) versions not higher than 11.2 is based on the NIST\* Sparse BLAS C implementation. This API uses a single function call for any compute operation and does not allow passing optimization information between function calls. This limits certain aggressive optimizations, such as balancing based on matrix sparsity patterns, matrix reordering, and even matrix format changes. These optimizations require time compared to one sparse-matrix vector multiplication and become beneficial only when multiple operations are performed with a single matrix, such as in iterative solvers. Intel MKL 11.3 Beta introduces an inspector-executor API, which uses a two-step approach to computations. The analysis stage is used to inspect the matrix sparsity pattern and apply matrix structure changes. The information from the analysis stage is used in subsequent calls to do computations with higher performance. The API offers a consistent support for C- and Fortran-style data layouts (row- and column-major) and indexing (zero-based and one-based), as well as combinations of these. It supports key sparse matrix storage formats: CSR (CSC), COO and BSR. I will discuss optimizations made to support iterative solvers with matrix-vector multiplications and triangular solvers aimed to achieve scalability on Intel® Xeon® and Intel® Xeon Phi™ processors.

### **Parallel implementation of the multifrontal hierarchically semi-separable solver for 3D Helmholtz problem**

*S.A. Solovyev*

This paper presents a parallel implementation of the multifrontal sparse solver to solve 3D Helmholtz problem. It is based on Gauss-elimination direct solver coupled with Nested Dissection reordering approach and compressing factors by using low-rank approximation technique and HSS format. Proposed algorithm is dedicated for on distributed memory systems using hybrid OpenMP and MPI features. OpenMP parallelization is performed due to optimized BLAS and LAPACK functions. MPI parallelization is based on distributing nodes of elimination tree between cluster nodes. While performing factorization process there are two types of cluster nodes: the first ones save factorized data and send them by request to other nodes for computing Schur complement; the other group of cluster nodes perform factorization. Proposed scheme is memory effective and can solve problems provided that compressed  $LDL^T$ -factors fit total clusters RAM (CRAM). The MPI-scalability of proposed scheme depends on the size of factors relative to the size of CRAM and increases with increasing number of cluster nodes.

The project has been partially supported by grants 14-01-31340, 14-05-31222, 14-05-00049, 14-05-93090.

### **Wavelets, optimal cubature formulas and densest lattice packing**

*N. A. Strelkov*

Two approaches to the construction of optimal cubature formulae are considered. The approximation subspace is the span of lattice translations of the fixed function. This problem is closely associated with the finding of characteristics of the best projection-net approximations. For example in some cases the optimal lattice satisfies the following condition: the dual lattice generates the densest packing of Lebesgue sets of

some function depending on the norm of Hormander spaces (for Sobolev spaces the problem comes to the densest lattice packing of spheres).

### **Численное решение трехмерных задач Дирихле для уравнения Гельмгольца с использованием мозаично-скелетонного метода**

*М. Ю. Талтыкина, А. А. Каширин*

Задачи Дирихле для уравнения Гельмгольца решаются в основном численно, так как их аналитические решения могут быть найдены лишь в простейших случаях. Численное моделирование предполагает построение дискретного аналога исходных задач, которое может быть сделано разными способами. В данной работе для этой цели используются граничные интегральные уравнения Фредгольма 1-го рода [1]. Полученные интегральные уравнения аппроксимируются системами линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с плотными матрицами. Для решения СЛАУ применяется обобщенный метод минимальных невязок (GMRES), его сложность составляет  $O(n^2)$ , где  $n$  – порядок СЛАУ. Основную сложность в GMRES вносит многократное применение матрично-векторного умножения. Для снижения сложности такого умножения предлагается использовать мозаично-скелетонный метод [2]. Его основной идеей является приближение больших блоков матрицы суммами одноранговых матриц (скелетонов). Умножение скелетонов на вектор происходит за линейное число операций. Численные эксперименты доказали эффективность предлагаемого подхода.

Список литературы

1. Каширин А.А., Смагин С.И. О численном решении задач Дирихле для уравнения Гельмгольца методом потенциалов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012. Т. 52, № 8. С. 1492–1505.
2. Tyrtyshnikov E.E. Mosaic-skeleton approximations // *Calcolo*. 1996. V. 33 (1-2). P. 47–57.

### **A highly scalable parallel algorithm for solving toeplitz tridiagonal systems of linear equations**

*A. V. Terekhov*

Based on a modification of the dichotomy algorithm, we propose a novel parallel procedure for solving tridiagonal systems of equations with Toeplitz matrices. Taking the structure of the Toeplitz matrices, we may substantially reduce the number of the preliminary calculations of the dichotomy algorithm, which makes it possible to effectively solve a series as well as a single system of equations. On examples of solving the 2D Poisson equation by the separation variable method and the 3D Poisson equation by a combination of the alternating direction implicit and the separation variable methods we show that the computation accuracy is comparable with the sequential version of the Thomas method, the dependence of the speedup on the number of processors being almost linear. The proposed modification is aimed at parallel implementation of a broad class of numerical methods including the Toeplitz tridiagonal matrices inversion.

The work was supported by a grant of the Russian Ministry of Education no. SP-191.2013.5, Russian Foundation for Basic Research RFBR, grant no. 14-01-31000.

### **On improving stability of solving systems of linear equations with symmetric indefinite sparse matrices**

*E. M. Fomenko*

Solving systems of linear equations with sparse symmetric positive definite matrices using direct methods usually consists of three main stages: symbolic  $LL^T$  factorization of the initial matrix, numeric factorization, and forward and backward substitution. This approach utilizes the sparsity of the matrix and has good scalability and accuracy properties. For indefinite matrices,  $LDL^T$  decomposition is used instead of  $LL^T$ . Unfortunately, in this case stability issues can arise due to necessity of division by zero or a small value. There are two main approaches that avoid these stability issues: perform a small perturbation to



replace any zero value with some non-zero value or perform factorization with full or partial pivoting. Both approaches have advantages and disadvantages: the first approach is fast but might produce an incorrect result, while the second one is accurate but degrades performance significantly.

This paper introduces a new approach that on the one hand preserves the structure of the matrix  $L$  obtained by symbolic factorization, which avoids pivots and thus has good performance and on the other hand allows an accurate solution by dynamically enlarging the size of the initial system.

Error estimation of the proposed algorithm and numeric experiments are presented.

## **Секция 3. ЧИСЛЕННОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ МОНТЕ-КАРЛО**

### **Статистические алгоритмы моделирования систем со случайной структурой**

*Т. А. Аверина*

В данной работе построены алгоритмы статистического моделирования решения систем со случайной структурой с распределенными переходами [1]. Алгоритмы созданы на основе разработанных ранее численных методов решения стохастических дифференциальных уравнений [2] и алгоритмов моделирования неоднородных пуассоновских точечных процессов [3]. Построен алгоритм, в котором для моделирования процесса смены структуры используется метод мажорантной частоты [4]. Этот алгоритм рекомендуется использовать в случае большого числа структур, когда достаточно трудоемко вычислять сумму функций при вычислении вероятностей прорезживания точечного потока максимальной интенсивности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00787) и гранта "Научные школы" НШ-5111.2014.1.

Список литературы

1. Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А. Анализ систем случайной структуры. М.: Наука, 1993.
2. Аверина Т.А. Устойчивые численные методы решения стохастических дифференциальных уравнений // Вестник Бурятского Гос. Унив. 2012. № 9. С. 91-94.
3. Аверина Т.А. Новые алгоритмы статистического моделирования неоднородных пуассоновских ансамблей // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2010. Т. 50. № 1. С. 16-23.
4. Михайлов Г.А., Рогазинский С.В. Модифицированный метод "мажорантной частоты" для численного моделирования обобщенного экспоненциального распределения // ДАН. 2012. Т. 444. № 1. С. 28-30.

### **Использование численных методов решения стохастических дифференциальных уравнений в моделировании неравновесных процессов**

*Т. А. Аверина, С. С. Артемьев, А. Л. Бондарева, Г. И. Змиевская*

Процесс конденсации с точки зрения неравновесной кинетики можно рассматривать как непрерывный процесс формирования кластеров. Уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК) определяет временную эволюцию плотности вероятности распределения кластеров по размерам [1, 2]. В данной работе уравнение ФПК заменяется соответствующим стохастическим дифференциальным уравнением (СДУ) с учетом свойств диффузионных марковских процессов. Поведение распределения решения полученных уравнений исследуется с помощью разработанных численных методов решения СДУ. В численном эксперименте рассчитана частотная интегральная кривая для решения СДУ [3].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00340, 14-01-00787) и гранта "Научные школы" НШ-5111.2014.1.

Список литературы

1. Зиньковская Т.В., Змиевская Г.И. Численная стохастическая модель образования кластеров // ДАН СССР. 1989. Т. 309. № 2. С. 301-305.
2. G. I Zmievskaya, T.A Averina, A.L. Bondareva. Numerical solution of stochastic differential equations in the sense of Stratonovich in an amorphization crystal lattice model // Appl. Num. Math. V. 93. July 2015. P. 15-29.
3. Артемьев С.С., Иванов А.А., Смирнов Д.Д. Новые частотные характеристики численного решения стохастических дифференциальных уравнений // СибЖВМ. 2015. Т.1 8. № 1. С. 15-26.

### **Эффективное осреднение стохастических радиационных моделей на основе статистического моделирования**

*А. Ю. Амбос*

Построены новые алгоритмы статистического моделирования переноса излучения через стохастические среды. Для этого разработана специальная геометрическая реализация "метода мак-

симального сечения", позволяющая учитывать поглощение излучения весовым экспоненциальным множителем. Построены асимптотические, по размеру среды, оценки параметров осреднённой радиационной модели, воспроизводящей осреднённую по реализациям среды вероятность прохождения. Используемый в работе специальный "распределительный" способ реализации псевдослучайных чисел позволяет провести сравнительный анализ результатов моделирования на основе соответствующего коррелирования статистических оценок.

### **Новые постановки стохастических ресурсных и транспортных задач и их численное исследование методом Монте-Карло**

*М. А. Анисова, А. В. Войтишек*

В данном докладе рассматриваются постановки ресурсных и транспортных задач, в которых допускаются случайные ошибки в начальных данных.

В качестве первого (достаточно простого) примера представлена итерационная линейная ресурсная модель. Простоту этого примера определяет то обстоятельство, что для соответствующей стохастической задачи удается аналитически определить вероятностные характеристики (в частности, математические ожидания и дисперсии) компонент предельных состояний рассматриваемых итерационных вычислительных процессов [1]. Полученные результаты подтверждены численными расчетами методом Монте-Карло (см., например, [2]).

Аналогичные подходы применены при решении стохастической нелинейной транспортной задачи [3].

Список литературы

1. Андорный Е.Н., Анисова М.А., Войтишек А.В., Перфильева Е.Г. Мера управляемости стохастических моделей, описываемых итерационными алгоритмами с периодическими множествами предельных состояний (в печати).
2. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М.: Изд. центр "Академия", 2006.
3. Анисова М.А., Харлампенков Е.Н. Подход к решению задачи в транспортной логистике с использованием нелинейной транспортной модели // Экономика и управление в машиностроении. 2014. №2 (32). С.59-63.

### **Рандомизированный алгоритм моделирования однородных случайных полей с невыпуклыми корреляционными функциями**

*Г. А. Бабичева, Н. А. Каргаполова, В. А. Огородников*

В докладе представлена специальная модификация известного алгоритма "по строкам и столбцам" моделирования однородных гауссовских случайных полей с корреляционной функцией гауссовского типа [1]. Предложенный модифицированный алгоритм позволяет моделировать однородные случайные поля с широким классом невыпуклых корреляционных функций. Предложенный алгоритм является приближенным в том смысле, что одномерные распределения построенного поля не являются нормальными, однако близки к ним.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-08988-а, 15-01-01458-а).

Список литературы

1. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука. 1982.

### **Алгоритмы статистического моделирования импульсных реакций бистатистических каналов связи**

*В. В. Белов, М. В. Тарасенков*

Рассматриваются алгоритмы метода Монте-Карло для моделирования импульсной переходной характеристики атмосферного (водного, смешанного) канала бистатистической оптико-электронной связи: алгоритм локальной оценки, "классической" двойной локальной оценки и предлагаемый мо-

дифицированный ее вариант. Выполнено сравнение погрешностей вычислений импульсной характеристики, полученной тремя рассматриваемыми алгоритмами. Показано, что предлагаемый алгоритм имеет значительные преимущества при невысоких оптических толщинах среды и в случаях, когда область, формирующая принимаемый сигнал велика. В остальных случаях эффективнее алгоритм "классической" двойной локальной оценки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00783-А, 15-07-06811-А), Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5, программы №8.1.27.2015 в рамках Программы "Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета" в 2015 г.

### **Оптимизация алгоритмов метода Монте-Карло для решения кинетического уравнения коагуляции с линейными коэффициентами**

*А. В. Бурмистров*

В данной работе рассматривается кинетическое уравнение Смолуховского, описывающее широкий класс процессов коагуляции в физических системах. В рамках предложенного ранее подхода [1] исследуются весовые алгоритмы для оценки линейных функционалов от решения рассматриваемого уравнения с линейными коэффициентами коагуляции, зависящими от двух параметров. Решается задача выбора оптимальных параметров, используемых в весовом алгоритме для моделирования соответствующей цепи Маркова.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00340) и Государственной программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-5111.2014.1).

Список литературы

1. А.В. Бурмистров, М.А. Коротченко. Весовые алгоритмы метода Монте-Карло для оценки и параметрического анализа решения кинетического уравнения коагуляции // СибЖВМ, 2014, Т. 17, № 2, с. 125-138.

### **О выборе константы в выражении для погрешности метода Монте-Карло**

*А. В. Войтишек, Е. Н. Андорный*

Принято считать, что погрешность  $\delta = |I - Z_n|$  метода Монте-Карло  $I = \mathbf{E}\zeta \approx Z_n = \frac{\zeta_1 + \dots + \zeta_n}{n}$  имеет асимптотику поведения при  $n \rightarrow \infty$  вида

$$\delta \approx r_n = \mathbf{H} \frac{\sqrt{D\zeta}}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

(см., например, [1]). В данном докладе обсуждается выбор константы  $\mathbf{H}$ .

Следуя соображениям из [1, 2], можно рекомендовать использовать значение  $H \approx 0,6745$ , для которого при достаточно больших  $n$  выполнено  $\mathbf{P}\{\delta \geq r_n\} \approx 1/2 \approx \mathbf{P}\{\delta \leq r_n\}$ . Величина  $r_n$  с таким выбором константы  $\mathbf{H}$  называется вероятной ошибкой метода Монте-Карло [2].

В докладе будут представлены результаты численных экспериментов для различных распределений величины  $\zeta$  (начиная с гауссовского распределения). Цели этих экспериментов следующие:

1) проверка целесообразности использования вероятной ошибки для описания характерного поведения погрешности метода Монте-Карло;

2) для различных классов вероятностных распределений определить границу  $N$ , начиная с которой (т. е. при  $n > N$ ) происходит установление поведения погрешности согласно закону (1); здесь, помимо расчетов, будут использованы разделы теории вероятностей, связанные с центральной предельной теоремой [3].

Список литературы

1. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. М.: Изд. центр "Академия", 2006.  
2. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973.  
3. Боровков А.А. Теория вероятностей. М.: Наука, 1986.

### **Алгоритм Монте-Карло для решения линейных алгебраических систем методом Зейделя**

*К. С. Волосенко, Т. М. Товстик*

В работе рассматривается алгоритм Монте-Карло, в основе которого лежит метод Зейделя. Моделируется цепь Маркова, связанная с приведенной линейной системой, и на каждом шаге обновляются все компоненты случайного вектора в заданном порядке. При имитации очередного приближения учитываются все обновления, полученные к этому моменту. Математические ожидания приближений совпадают с соответствующими приближениями при решении системы линейных уравнений методом Зейделя.

Получена система линейных уравнений для вторых моментов предельного случайного вектора. Для вычисления взаимных корреляций предельного вектора построена система линейных уравнений, в которую входят, также элементы предельной матрицы взаимных корреляций двух последовательных приближений.

Данная работа является продолжением работы [1], в которой моделируется ряд Неймана.

Список литературы

1. Т.М.Товстик. К решению систем линейных алгебраических уравнений методом Гиббса – Метрополиса. Вестник СПбГУ. Серия 1. 2011. № 4. С.90-98.

### **Построение оценок математических ожиданий выражений, содержащих производные по параметрам времени первого выхода диффузионного процесса из области**

*С. А. Гусев*

Рассматривается задача оценки производных по параметрам математических ожиданий функционалов диффузионных процессов с условием поглощения на границе. Одной из проблем в решении такой задачи является дифференцирование по параметрам под знаком математического ожидания времени первого выхода рассматриваемого случайного процесса из области. Производные времени первого выхода могут быть выведены из уравнения, которое получается в результате применения формулы Ито к некоторой достаточно гладкой функции, которая обращается в нуль на границе. Однако здесь возникает необходимость дифференцирования интеграла Ито по верхнему пределу. В работе показано, что эта проблема численно разрешима, если аппроксимировать приращения винеровского процесса с помощью гауссовского процесса, имеющего экспоненциальную корреляционную функцию, согласованную с длиной шага в методе Эйлера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00340-а), научной программы "Ведущие научные школы" (код проекта НШ-5111.2014.1).

### **Численное моделирование активной теплозащиты фюзеляжа сверхзвукового самолета**

*С. А. Гусев, В. Н. Николаев*

В работе рассматривается фюзеляж сверхзвукового самолета с элементами активной теплозащиты, которая представляет собой следующую конструкцию: а) внешнюю тонкую оболочку, состоящую из металла или композиционного материала; б) внутреннюю часть покрытия, на основе сотовых теплозащитных панелей; в) каналы, продуваемые воздухом, которые расположены между внешней оболочкой и внутренней частью покрытия и представляют собой систему охлаждения. Построена математическая модель для расчета динамики тепловых процессов в рассматриваемом теплозащитном покрытии. При этом расчет температурных полей во внутренней части покрытия осуществляется на основе численного решения стохастических дифференциальных уравнений с распараллеливанием вычислений. Проведено численное исследование параметров модели, соответствующих заданному режиму теплозащиты.



Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00340-а) и научной программы "Ведущие научные школы" (код проекта НШ-5111.2014.1).

### **Клеточный автомат с целевой функцией**

*О. О. Евсютин*

В данной работе вводится модификация классической модели клеточного автомата [1, 2], динамика которой направлена на решение задачи непрерывной оптимизации. Для этого в состав клеточно-автоматной модели включается целевая функция  $n$  переменных, а алфавит внутренних состояний модифицируется: в качестве состояния клетки принимается  $n$ -мерный вектор, дополненный целочисленной меткой.

Данная модель, получившая название клеточного автомата с целевой функцией, уже не является дискретной, однако сохраняет свойства локальности и однородности, присущие клеточному автомату.

В работе исследуется динамика клеточного автомата с целевой функцией при выборе различных локальных правил перехода, носящих как детерминированный, так и стохастический характер.

На основе введенной модели получены алгоритмы непрерывной оптимизации, которые следует отнести к классу стохастических алгоритмов за счет использования случайных величин в процессе развития клеточного автомата с целевой функцией.

Проведенные эксперименты показали, что данные алгоритмы по своей эффективности сравнимы с другими алгоритмами непрерывной оптимизации, при построении которых использован клеточно-автоматный подход [3].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания ТУСУР на 2015 г. (проект № 3657).

Список литературы

1. Кудрявцев В.Б., Подколзин А.С., Болотов А.А. Основы теории однородных структур. М.: Наука, 1990. 296 с.
2. Бандман О.Л. Дискретное моделирование физико-химических процессов // Прикладная дискретная математика. 2009. № 3. С. 33–49.
3. Vafashoar R., Meybodi M.R., Momeni Azandaryani A.H. CLA-DE: a hybrid model based on cellular learning automata for numerical optimization // Applied Intelligence. 2012. V. 36, iss. 3. P. 735–748.

### **Рандомизация квазислучайных последовательностей и сравнительная трудоемкость стохастических алгоритмов**

*С. М. Ермаков*

В докладе рассматриваются некоторые важные связи детерминированных и стохастических вычислительных методов. Рассматриваются классы задач, для которых стохастические методы имеют (асимптотически) меньшую трудоемкость по сравнению с детерминированными.

Также приводятся новые результаты относительно расслоенной выборки и ее связей с квазислучайными последовательностями.

### **Статистическое моделирование в задаче определения некоторых параметров облаков по отраженному многократно-рассеянному излучению от лидаров наземного и аэрокосмического базирования**

*Е. Г. Каблукова, А. Б. Каргин, Б. А. Каргин*

В реальной атмосфере микрофизические параметры рассеивающей среды испытывают случайно-неоднородные вариации во времени и пространстве. Поэтому в настоящем исследовании прямые и обратные задачи лазерного зондирования в стохастической постановке, когда оптические параметры уравнения переноса, описывающего многократное рассеяние, задаются в форме случайных функций пространства и времени. Решение уравнения переноса со случайными параметрами выполняется методом Монте-Карло. Постановка прямых и обратных задач теории лазерного зон-

дирования основана на анализе функциональных и корреляционных связей, определяющих информативность и взаимозависимость оцениваемых и измеряемых параметров в заданном эксперименте. Представлены результаты большой серии численных экспериментов. Эти результаты численно устанавливают корреляционные связи между временным распределением эхо-сигнала и случайными пространственно-временными вариациями вертикального профиля коэффициента ослабления аэрозольной атмосферы и нижней границы жидкокапельного облака.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №43 и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 5-01-00894).

### **Supercomputer simulation of stochastic dynamics of ions in an optical lattice**

*L. P. Kamenshchikov, I. V. Krasnov*

Ion trapping in the optical lattices is being intensively studied in recent years [1,2]. This interest is explained by their numerous important physical applications which are associated with the possibility of forming ion Coulomb clusters in such traps.

In contrast to our previous work [2], in the present report, we do not use the approximation of slow ions, but take into account non-conservative nature of trapping force in optical superlattice, and also the velocity dependence of friction coefficient of ions and multiplicative nature of quantum fluctuations of optical forces. Our simulations show that these factors significantly influence as on conditions of formation of the ion Coulomb clusters and also on their characteristics.

We also demonstrate a comparison of numerical calculations with analytical renormalized model. In this model original optical and Coulomb forces are replaced by the effective (renormalized) forces. Good agreement of results is shown but only for the moments of time when the cluster has been completely created (not transient regime).

Simulation of ion motion in 3D optical lattices is based on the numerical solution of stochastic differential equations using the MVS-100K supercomputer. The uniform random number generator well-adapted for parallel computations was used [3].

#### References

1. Schneider Ch., Enderlein M., Huber T., Schaetz T. Optical trapping of an ion // Nature Photonics. 2010. № 4. P. 772-775.
2. I.V.Krasnov, L.P. Kamenshchikov. All-optical trapping of strongly coupled ions // Optics Communications. 2014. V. 312, iss. 3. P. 192-198.
3. G.A. Mikhailov, M.A. Marchenko. Parallel realization of statistical simulation and random number generators // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2002. V. 17, № 1. P. 113 -124.

### **Стохастические модели пространственно-временных полей метеорологических элементов в районе озера Байкал**

*Н. А. Каргаполова*

В докладе предложены стохастические модели метеорологических полей среднемесячной температуры воздуха и суммарного за месяц количества осадков. Модели основаны на многолетних данных реальных наблюдений на метеостанциях, расположенных в районе озера Байкал. Предложенные модели позволяют моделировать как пространственные поля метеорологических элементов с учетом их неоднородности по одномерным распределениям, так и пространственно-временные поля с учетом годового хода реальных процессов.

При построении моделей использованы новые экономичные алгоритмы моделирования негауссовских полей, позволяющие учитывать специфику корреляционной структуры полей для данного региона.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-08988-а, 15-01-01458-а).

### **Клеточно-автоматная модель реакции окисления монооксида углерода, учитывающая изменения геометрии поверхности катализатора Pt<sub>110</sub>**

*А. Е. Киреева*

Многие катализаторы состоят из наночастиц, нанесенных на инертный носитель. Кинетика физико-химических процессов, протекающих на наночастицах, существенно отличается от кинетики реакций на монокристалле. Важными особенностями протекания реакций на наночастицах являются изменение формы и размера частиц, а также наличие диффузии реагентов между частицами, что способствует синхронизации процессов на всём катализаторе. Для изучения таких реакций разработана стохастическая клеточно-автоматная (КА) модель реакции окисления монооксида углерода на наночастицах платины. КА-модель реакции окисления основана на [1], изменение морфологии катализатора происходит вследствие диффузии атомов платины. С помощью КА-модели исследуется влияние скорости диффузии и начальной геометрии наночастиц на кинетику реакции окисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-31425\_мол\_а).

Список литературы

1. Elokhin V.I. Stochastic models of physicochemical processes in catalytic reactions – self-oscillations and surface waves in CO oxidation reaction. Chapter 9 in: Theory and Applications of Monte Carlo Simulations, Croatia: In Tech Europe Rijeka, 2013, pp. 173-192.

### **Стохастический и клеточно-автоматный алгоритмы для анализа статистических структур случайных полей концентрации электронов и дырок**

*А. Е. Киреева, К. К. Сабельфельд*

Разработаны стохастические и клеточно-автоматные (КА) модели и алгоритмы для моделирования процессов аннигиляции электронов и дырок в неоднородных полупроводниках при наличии стационарного источника избыточных электронно-дырочных пар, случайно распределенных на поверхности кристалла. Стохастическая и КА модели аннигиляции построены на основе системы неоднородных по пространству нелинейных интегро-дифференциальных уравнений типа Смолуховского со случайной правой частью [1].

Подробно исследуется переход к стационарному решению, при этом контроль точности осуществляется с помощью решения стационарного уравнения Смолуховского стохастическим проекционным методом [2]. С помощью разработанных моделей проведено численное исследование кинетики процесса аннигиляции электронов и дырок при наличии центров рекомбинации и диффузии электронов. В результате компьютерного моделирования обнаружено, что в процессе аннигиляции происходит формирование макрокластеров электронов и дырок и при наличии случайного источника электронов и дырок. Для изучения параметров кластеризации вычислены статистические характеристики пространственно-временного распределения электронов и дырок, а также проведен корреляционный анализ случайных полей их концентраций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 14-11-00083.

Список литературы

1. Sabelfeld K.K., Brandt O., Kaganer V.M. Stochastic model for the fluctuation-limited reaction-diffusion kinetics in inhomogeneous media based on the nonlinear Smoluchowski equations // Journal of Mathematical Chemistry, 2015. vol. 53, issue 2, 651-669.

2. K. Sabelfeld. Stochastic Algorithms in Linear Algebra - beyond the Markov Chains and von Neumann - Ulam Scheme. Lecture notes in computer science, 6046 (2011), 14-28.

### **О некоторых проблемах применения критериев проверки статистических гипотез и использовании имитационного моделирования при их решении**

*Б. Ю. Лемешко*

В докладе с опорой на статистическое моделирование обсуждаются проблемы, ограничивающие область применения некоторых групп параметрических и непараметрических критериев проверки статистических гипотез.

В частности, обсуждаются вопросы применения непараметрических критериев согласия (критериев Колмогорова, Купера, Крамера – Мизеса – Смирнова, Ватсона, Андерсона – Дарлинга, Жанга) при проверке сложных гипотез [1].

Рассматриваются проблемы, связанные с применением специальных критериев проверки нормальности, в частности, смещённость ряда критериев относительно некоторых конкурирующих гипотез [2]. Отмечаются аналогичные недостатки, связанные с применением для проверки нормальности некоторых непараметрических критериев согласия (в частности, критериев Жанга).

Рассматриваются аналогичные проблемы, ограничивающие возможности специальных критериев проверки равномерности. В частности, показывается что большая часть специальных критериев оказывается смещённой относительно близких конкурирующих законов, функции распределения которых пересекают функцию распределения равномерного закона [3]. Отмечается, что, к сожалению, этим недостатком обладает большая часть непараметрических критериев согласия (критерии Колмогорова, Крамера – Мизеса – Смирнова, Андерсона – Дарлинга и, в меньшей степени, критерии Жанга).

Обсуждается опыт использования статистического моделирования в качестве инструмента исследования, позволяющего осуществлять корректные статистические выводы в случае применения критериев проверки различных статистических гипотез в условиях нарушения стандартных предположений (в частности, критериев проверки случайности и отсутствия тренда, критериев проверки однородности дисперсий и других).

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания (№ 2.541.2014/К).

#### Список литературы

1. Лемешко Б. Ю. Непараметрические критерии согласия: Руководство по применению: Монография / Б. Ю. Лемешко. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 163 с. DOI: 10.12737/11873.
2. Лемешко Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона: Руководство по применению: Монография / Б. Ю. Лемешко. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 160 с. – (Научная мысль). DOI: 10.12737/6086.
3. Лемешко Б. Ю., Блинов П. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. Руководство по применению: Монография / Б. Ю. Лемешко, П. Ю. Блинов. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 183 с. – (Научная мысль). DOI: 10.12737/11304.

## **Numerical modeling fire spread dynamics using random field models**

*N. E. Lepp*

The generation of random spatial data on a computer is an important tool for understanding the behavior of spatial landscape processes. Random field models provide an adequate description of the data in a wide range of tasks of ecological modeling [1]. The most frequently used random field model is the Gaussian random field, which is fully described by the two first moments.

In recent years, stochastic models of fire spread are actively developed and improved [2, 3]. This work presents a stochastic approach to the two-dimensional fire spread simulations at landscape scale based on the random field theory. Random field models are considered as spatial information about the environment. Two approaches were chosen for constructing a two-dimensional random field. In the first case is based on an autoregressive scheme including some spatial dependence. Other approach is formation of the field as a sweep of the random vector. Different the unsymmetrical probability distributions were used for random vector generate. Fire propagation across heterogeneous fuel is simulated by wave-algorithm on space lattice.

The proposed stochastic approach allows obtain probabilistic contour plots, burn size distributions, as well as estimate of the mean perimeter on time step. The results of simulations at different spatial scales are discussed.

#### References

1. Christakos, G. Random Field Models in Earth Sciences, San Diego: CA, Academic Press 1992. 454pp.

2. Krougly Z., Creed I., Stanford D. A stochastic model for generating disturbance patterns with in landscapes // Computers & Geosciences. 2009 V. 35. P. 1451–1459

3. Finney M.A. A Method for Ensemble Wildland Fire Simulation. // Environ Model Assess 2011. V.16 P.153–167 DOI 10.1007/s10666-010-9241-3.

### **Решение нелинейного уравнения Шрёдингера методом Монте-Карло**

*В. Л. Лукинов*

Доклад посвящен численному анализу решения нелинейного уравнения Шрёдингера с аддитивными Гауссовым шумом, описывающего распространение световых импульсов в волоконно-оптических линиях (ВОЛС) связи [1]. Исследуется спектральная эффективность солитонных ВОЛС, а также эффекты, влияющие на её рост. С помощью комбинации аналога нелинейного метода Фурье расщепления по физическим процессам на длинных участках [2,3] и метода Эйлера для решения СДУ на коротком участке [4], проводится стохастический анализ взаимодействия двух солитонов. Статистическим моделированием на суперкомпьютере исследуется устойчивость солитонов на длинных расстояниях в зависимости от характеристик случайных шумов передатчика и шума, возникающего вследствие оптически усиленной спонтанной эмиссии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00340 и 14-01-31451).

Список литературы

1. G. A. Agrawal, Nonlinear Fiber Optic, Academic Press, Boston, 2001.

2. А. А. Редюк, А. С. Скидин, А. В. Шафаренко, М. П. Федорук, “Прямое моделирование статистики ошибок при передаче данных по высокоскоростной линии связи с помощью четырёхуровневого фазового формата модуляции”, Квант. электрон., 42:7 (2012), 645–649.

3. А. Е. Исмагулов, С. А. Бабин, Е. В. Подивилов, М. П. Федорук, И. С. Шелемба, О. В. Штырина, “Модуляционная неустойчивость при распространении узкополосных наносекундных импульсов в волоконном световоде с аномальной дисперсией”, Квант. электрон., 39:8 (2009), 765–769 .

4. Артемьев С.С. и др., Анализ стохастических колебаний методом Монте-Карло на суперкомпьютерах, Новосибирск, 2015 (в печати).

### **Study of efficiency of parallel stochastic simulation algorithm to solve coagulation equation**

*M. A. Marchenko*

For numerical analysis of spatially inhomogeneous coagulation process, we present new parallel Direct Simulation Monte Carlo algorithm. The algorithm is based on simulation of multiparticle ensembles using domain decomposition and splitting techniques. To study accuracy and efficiency of the parallel algorithm, we consider the spatially inhomogeneous coagulation equation with known analytical solution. Namely, to investigate deterministic and statistical errors of the algorithm with respect to its parameters (initial number of test particles, time step size, regularization parameter of the coagulation kernel), we perform high precision computations on high-performance computer using the software library PARMONC which was developed by the author earlier. We also study the efficiency and speed-up of the parallel algorithm in the scenario when we increase both the number of processors and initial number of particles (and also changing other parameters of the algorithm) to enable better accuracy of simulation.

This work was partially supported by the grants of the Russian Foundation for Basic Research No. 15-01-00894, 15-01-08988, 13-01-00746, 15-01-09230 and 13-07-00589; Program of Fundamental Research of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 43.

### **Универсальные модификации ветвления и расщепления траектории для моделирования весовой оценки по столкновениям**

*И. Н. Медведев*

Для решения интегральных уравнений 2-го рода методом Монте-Карло обычно используют так называемую схему Неймана – Улама на основе связи между этими уравнениями и однородными цепями Маркова, обрывающимися с вероятностью единица. Базовой величиной при этом является



случайный “вес”, который после каждого перехода в моделируемой цепи Маркова домножается на отношение соответствующего значения ядра уравнения к переходной плотности. Если значения весов не превосходят единицы, то средний квадрат, а следовательно, и дисперсия стандартной оценки по “столкновениям” для изучаемого функционала, ограничены [1]. Однако для большого класса задач в стандартной схеме Неймана – Улама возникают веса, превосходящие единицу, и дисперсия оценки по столкновениям может быть бесконечной, что существенно затрудняет исследование вычислительной погрешности. В докладе представлены новые весовые алгоритмы метода Монте-Карло с ветвлением (расщеплением) траектории в случае, когда значение очередного весового множителя превосходит единицу. Исследуется эффективность использования предложенных алгоритмов в методе подобных траекторий [2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-01-00034а, 13-01-00441а, 13-01-00746а) и гранта “Ведущие научные школы” № 5111.2014.1.

Список литературы

1. Медведев И.Н., Михайлов Г.А. Исследование весовых алгоритмов метода Монте-Карло с ветвлением // Журн. вычисл. математики и мат. физики. - 2009. Т. 49, № 3, С. 441-452
2. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973.

### **Спектральная модель одного класса периодически коррелированных процессов**

*А. М. Медвяцкая, В. А. Огородников*

В докладе рассматривается приближенный алгоритм моделирования периодически коррелированных случайных процессов на основе специальной модификации нерандомизированного спектрального представления стационарного случайного процесса непрерывного аргумента. Модификация этого представления состоит в том, что вместо спектральной плотности для стационарного процесса использовалось семейство спектральных плотностей, определяемое периодически меняющимся временным параметром. Показано, что корреляционные функции для этого класса процессов имеют свойства корреляционных функций периодически коррелированного процесса. Приводятся примеры предельных корреляционных функций для различных спектральных плотностей.

По модельным реализациям такого типа получены оценки их корреляционных функций, иллюстрирующие полученные теоретические результаты.

Список литературы

1. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2005.

### **Новые результаты и задачи теории алгоритмов статистического моделирования переноса излучения**

*Г. А. Михайлов*

В докладе представлены новые результаты разработки алгоритмов статистического моделирования переноса излучения для исследования влияния вариации параметров и стохастичности радиационной модели. Эти разработки начинались под руководством Г.И. Марчука с целью решения актуальных задач атмосферной оптики. В статье даны формулировки ряда соответствующих новых математических задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00894, 13-01-00746, 13-01-00441); проекта НШ-5111.2014.1

### **Изучение методом Монте-Карло особенностей лидарных эхо-сигналов, обусловленных многократным рассеянием**

*С. М. Пригарин, Т. В. Алешина, Н. К. Че*

Работа посвящена исследованию методом Монте-Карло влияния многократного рассеяния излучения на формирование лидарных эхо-сигналов при дистанционном зондировании атмосферной

облачности. В частности, описывается эффект возможного увеличения контрастности временно-го эхо-сигнала для моностатического лидара за счет многократного рассеяния. Изучаются условия, при которых эхо-сигналы широкоугольных ССD-лидаров представляют собой расширяющиеся светящиеся кольца и диски. Методом статистического моделирования исследуются характеристики пространственно-временного поля яркости, порожденного рассеянием лазерного импульса в облачной среде. В качестве примеров приводятся результаты нескольких вычислительных экспериментов, связанных с зондированием атмосферной облачности наземными и космическими лидарами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проект 15-01-00783), программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 43 по стратегическим направлениям развития науки “Фундаментальные проблемы математического моделирования” и государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант Президента Российской Федерации НШ-5111.2014.1).

### **Весовые модификации прямого статистического моделирования с рандомизированным ветвлением или расширением модельного ансамбля**

*С. В. Рогазинский, Г. А. Михайлов*

Построена модификация весового статистического моделирования для приближённого решения нелинейного кинетического уравнения. В случае, когда вспомогательный вес превосходит единицу, реализуется рандомизированное ветвление траектории модельного ансамбля частиц или соответствующее его расширение. Сравнительный анализ таких вариантов алгоритма осуществляется для специально сформулированной модельной задачи о релаксации смеси двух газов с сильно различающимися концентрациями. Полученные численные результаты при модифицированном моделировании начальной точки траектории указывают на предпочтительность второго варианта.

Работа проводилась при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 43, Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00894, 13-01-00746, 13-01-00441), проекта НШ-5111.2014.1.

### **Алгоритм метода Монте-Карло для определения углового распределения поляризованного излучения**

*Н. В. Трачева, Г. А. Михайлов, С. А. Ухинов*

Авторами представлен новый алгоритм метода Монте-Карло для исследования углового распределения интенсивности прошедшего через слой вещества излучения на основе модифицированного метода Н. Н. Ченцова для оценки неизвестной плотности вероятностей [1]. В предложенном методе, плотность соответствующего углового распределения раскладывается по полиномам, ортонормированным с "ламбертовским" весом [2]. Проведенные прецизионные вычисления с применением данного алгоритма дают возможность точно оценить даже малое влияние поляризации, а также отклонение изучаемого углового распределения от распределения Ламберта.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 43, Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-01-00441, 13-01-00746, 15-01-00894, 15-01-08988) и проекта НШ-5111.2014.1.

Список литературы

1. Ченцов Н. Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. М.: Наука, 1972. 520 с.
2. Михайлов Г.А. Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло. Новосибирск: Наука, 1974. 144 с.

### **Advanced stochastic models and algorithms with applications in optoelectronics**

*K. K. Sabelfeld*

In this talk, stochastic models and algorithms we suggested in [1, 2] for a variety of problems in optoelectronics are presented and further developed. The underlying idea comes from hybridization of the kinetic Monte Carlo approach and random walk based probabilistic representations of the solutions to high-

dimensional boundary value problems. The first class of problems is related to the annihilation of electrons and holes in semiconductors which we describe by a fluctuation-induced nonlinear reaction-diffusion integro-differential Smoluchowski equations. The solutions to these equations are random fields. We have studied the statistical structure of these fields which appear to be stationary in time and homogeneous and isotropic in space in the case of a stationary and spatially random source of electron-hole pairs. The simulation results agree well with the theoretically available information on the large time asymptotics of the luminescence intensity. Another interesting class of problems is the exciton transport in the vicinity of a set of randomly distributed dislocations. Even linear, this kind of exterior boundary value problems is quite difficult and involves many randomly varying parameters to be taken into account. We present the developed algorithm and results of simulations for the case of a set of correlated threading dislocations.

Support of the Russian Science Foundation under the grant N 14-11-00083 is kindly acknowledged.

#### References

1. K. Sabelfeld, O. Brandt, V. Kaganer. Stochastic model for the fluctuation-limited reaction-diffusion kinetics in inhomogeneous media based on the nonlinear Smoluchowski equations. *Journal of Mathematical Chemistry*, 2015, v. 53, issue 2, 651-669.

2. K. Sabelfeld, A. Levykin, A. Kireeva. Stochastic simulation of fluctuation-induced reaction-diffusion kinetics governed by Smoluchowski equations. *Monte Carlo Methods and Applications*, 2015, v. 21, issue 1, 33-48.

### **Стохастический и детерминированный алгоритмы для моделирования транспорта экситонов при наличии проникающих дислокаций**

*К. К. Сабельфельд, А. Е. Киреева*

Разработаны стохастические алгоритмы для моделирования процессов транспорта экситонов в полупроводниках с учетом наличия проникающих дислокаций. Задача описывается диффузионным уравнением в полупространстве, куда помещена дислокация в виде полубесконечного цилиндра. На границах цилиндра и ограничивающей плоскости заданы третьи граничные условия, определяющие частичные поглощение и отражение экситонов. Экситоны могут поглощаться в объеме, коэффициент поглощения задан. Источник экситонов имеет осевую симметрию (ось источника параллельна оси дислокации), он задается из теоретических и экспериментальных данных. Физически измеримая величина, определяющая влияние дислокации, – это концентрация экситонов, поглотившихся в объеме.

Поскольку область, где решается задача, неограниченна, мы провели сравнительные расчеты двумя методами – методом кинетического Монте-Карло, реализованного по клеточно-автоматной схеме на конечной области (см. например, [1]), и методом блуждания по сферам для исходной бесконечной области [2]. Результаты, полученные этими двумя методами, хорошо согласуются между собой и с данными реальных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 14-11-00083.

#### Список литературы

1. K. Sabelfeld, A. Levykin, A. Kireeva. Stochastic simulation of fluctuation-induced reaction-diffusion kinetics governed by Smoluchowski equations. *Monte Carlo Methods Appl.* 2015; 21 (1), pp. 33–48.

2. K.K. Sabelfeld. *Monte Carlo methods in boundary value problems*. Springer Verlag. New York - Heidelberg - Berlin, 1991.

### **Алгоритмы моделирования кусочно-линейных процессов на пуассоновских потоках**

*О. В. Сересева, А. Огородников*

Приведены результаты исследования кусочно-линейного случайного процесса, значения которого в опорных точках, образующих пуассоновский поток точек, являются независимыми случайными величинами с произвольным одномерным распределением. Численно показано, что процесс является асимптотически стационарным. Рассмотрен также нестационарный кусочно-линейный процесс на пуассоновских потоках, значения которого в пуассоновских опорных точках являются суммой независимых равномерно распределенных случайных величин с последовательно увеличи-

вающимся числом слагаемых. Для этих процессов получены точные выражения для средних значений и дисперсий как функций от времени.

### **Численное стохастическое моделирование совместных полей температуры воздуха и относительной влажности**

*С. С. Скворцов, Н. А. Каргаполова*

В докладе предложена стохастическая модель совместных негауссовских пространственных полей приземной температуры воздуха и относительной влажности. Модель построена с использованием уравнения состояния влажного воздуха в предположении неоднородности полей температуры и влажности по распределениям и однородности полей по корреляциям. В качестве входных параметров модели использованы статистические характеристики полей метеозаэроэлементов, оцененные по данным реальных наблюдений в Новосибирской области. С помощью модели проведено исследование свойств некоторых аномальных метеорологических явлений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-08988-а, 15-01-01458-а).

### **Явная зависимость автокорреляций потока нейтронов от доминантного отношения в критических расчетах больших реакторов по методу Монте-Карло**

*Е. А. Сушино-Хоменко, С. С. Городков*

В расчетах больших реакторов по методу Монте-Карло наблюдается значительное смещение в сторону недооценки погрешностей расчета потока нейтронов. Общеизвестно, что эта недооценка тесно связана с отношением двух собственных значений оператора переноса, ближайшего к главному и второму. Это отношение называется доминантным. В работе предполагается тесная аналогия между автокорреляциями нейтронного потока в расчетах Монте-Карло и вариациями потока из-за случайных отклонений в свойствах топливных сборок в пределах технологических допусков. Из этой аналогии вытекают интересные следствия, которые подтверждаются в весьма реалистичных расчетах.

Получено также полезное выражение для быстрой оценки минимального числа историй, которые необходимо промоделировать для достижения заданной величины погрешности в расчетах больших реакторов.

### **Гиперспектральный подход на основе метода Монте-Карло в ДЗЗ с учетом поляризации в условиях Арктики**

*В. А. Фалалеева, Б. А. Фомин, Т. А. Сушкевич*

Цель исследования связана с необходимостью создания вычислительной инфраструктуры использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), когда на передний план выдвигаются разработки, касающиеся повышения информативности и достоверности обрабатываемых аэрокосмических данных.

Составной частью таких разработок являются вычислительные процедуры распознавания природно-техногенных объектов по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям (сотни спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной области, разрешение в единицы нанометра). Буквально в последние несколько лет благодаря достижениям в элементной базе оптоэлектронного приборостроения внимание исследователей привлекли и проблемы, связанные с учетом состояния поляризации и деполяризации излучения. В качестве инструментария решения этой фундаментальной задачи служат разработанные авторами ранее и предполагаемые для дальнейшего развития методы, алгоритмы и расчетные программы обработки данных гиперспектрального зондирования на основе решения прямых и обратных задач теории переноса излучения и новых подходов в теории информатики. Эти задачи относятся к классу самых сложных вычислительных задач в кинетической теории переноса электромагнитного излучения в рассеивающих и поглощающих средах и аэрокосмического ДЗЗ [1]

Для моделирования и обработки таких измерений В.А.Фалалеевой разрабатывается поляризационная модель переноса солнечной радиации, основанная на методах Line-by-Line (LbL) для учета спектрального поглощения атмосферными газами с требуемым для практики разрешением по спектру длин волн и Монте-Карло, в основе которого лежит интегральное представление кинетического уравнения Больцмана, позволяющее моделировать измерения излучения и характеристик его поляризации с высокой точностью и любым спектральным разрешением [2-5]. Помимо модели рассмотрены информационные аспекты применения данного метода в ДЗЗ не только аэрозольного загрязнения атмосферы в видимом диапазоне спектра солнечного излучения, но и перистых облаков, для которых характерна анизотропная среда, как и в условиях региона Арктики.

Исследование проведено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00783, 14-01-00197).

#### Список литературы

1. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
2. Фалалеева В.А. Гиперспектральная модель переноса солнечного излучения в облаках с учетом анизотропии среды и поляризации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015 (в печати).
3. Fomin B.A., Falaleeva V.A. The vertical structure of aerosols and clouds derived from satellites equipped with high-resolution polarization sensors // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35. No. 15. P. 5800-5811.
4. Fomin B. A., Falaleeva V. A., Cahalan R.F., et al. The Line-by-Line and Polarized Monte Carlo Atmospheric Radiative Transfer Model // Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean (IRS2012): Proceedings of American Institute of Physics The International Radiation Symposium (IRC/IAMAS). 2013. № 1531. P. 47-50.
5. Fomin B., Falaleeva V. A Polarized Atmospheric Radiative Transfer Model For Calculations Of Spectra Of The Stokes Parameters Of Shortwave Radiation Based On The Line-By-Line And Monte Carlo Methods. // Atmosphere. 2012. № 3(4). С. 451-467.

### **Стохастический метод коллокаций для решения начально-краевых задач со случайными входными данными**

*И. А. Шалимова*

Настоящая работа посвящена решению начально-краевых задач математической физики со случайными входными данными. Мы исследовали два класса таких задач: стационарное уравнение Дарси со случайным коэффициентом гидравлической проницаемости, и нестационарное уравнение диффузии, где распределение концентрации в нулевой момент времени определяется случайным полем заданной структуры. Проблема, возникающая при решении задач со случайными входными данными традиционными методами, – это большая трудоемкость алгоритма. Действительно, традиционный подход состоит в аппроксимации дифференциальной задачи системой линейных алгебраических уравнений и численном ее решении для большого ансамбля реализаций входящего случайного поля. Очевидно, что при вычислении различных функционалов от решения данный подход будет весьма трудоемким. В данной работе мы развиваем другой подход [1], основанный на разложении решения в полиномиальный хаос в вероятностном пространстве входных данных, коэффициенты разложения которого находятся методом стохастических коллокаций. В этом случае трудоемкость алгоритма определяется порядком приближения полиномиального хаоса и числом точек коллокаций, что может приводить к существенному повышению эффективности метода. В работе представлены примеры решения уравнений Дарси и теплопроводности со случайными коэффициентами, а также со случайными начальными распределениями. Приведены значения функционалов, подсчитанных методом Монте-Карло и стохастическим методом коллокаций, и дан сравнительный анализ этих двух методов.

Работа выполнена совместно с К.К. Сабельфельдом и О.В. Дульзон, и при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 14-11-00083.

#### Список литературы

1. I. Shalimova and K. Sabelfeld. Stochastic polynomial chaos based algorithm for solving PDS with random coefficients. Monte Carlo Methods and Applications, vol.20 (2014), issue 4, 279-289.



### **Статистическая погрешность метода прямого статистического моделирования: обобщение подходов и практические рекомендации**

*Е. В. Шкарупа, М. Ю. Плотников*

Метод прямого статистического моделирования (ПСМ) в настоящее время широко используется для решения задач динамики разреженного газа. Одним из важных критериев качества результатов, полученных методом статистического моделирования (Монте-Карло), является их статистическая погрешность. В классическом методе Монте-Карло статистическая погрешность оценивается величиной стандартного отклонения, которое определяется дисперсией стохастической оценки и числом ее реализаций. При этом предполагается, что выборочные реализации стохастической оценки независимы. В отличие от классического метода Монте-Карло в методе ПСМ при решении стационарных задач, как правило, производится осреднение данных вдоль одной траектории, поэтому выборочные реализации стохастических оценок зависимы. Степень зависимости выборочных реализаций оказывает существенное влияние на величину статистической погрешности. Структура используемых в методе ПСМ стохастических оценок также усложняет вычисление погрешности. Вследствие этого часто статистическая погрешность метода ПСМ при расчете параметров течения газа не оценивается адекватно.

В работе [1] был предложен подход к оцениванию статистической погрешности метода на основе асимптотического поведения дисперсий (при уменьшении размера ячеек), применимый при независимости выборочных значений. Авторы работы [2] используют для этой цели результаты равновесной статистической физики, при этом практически не требуются дополнительные вычисления. Другой подход к оцениванию статистической погрешности метода ПСМ предложен в работе [3]. Он основан на центральной предельной теореме для однородных цепей Маркова и учитывает временные корреляции выборочных значений случайных величин, однако, требует дополнительных вычислений. В работе [4] проводятся параллели между статистической погрешностью метода и флуктуациями физических величин.

Данная работа обобщает все имеющиеся подходы и представляет практические рекомендации по оцениванию статистической погрешности метода ПСМ с учетом зависимости выборочных значений. Проведено тестирование рассматриваемых подходов на характерных примерах задач динамики разреженного газа.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-01-00746, 14-08-00534, 15-01-00894).

Список литературы

1. Rogasinsky S.V., Levin D.A., Ivanov M.S. // Proc. of 25-th Intern. Symp. on RGD – 2007. - P. 391-395.
2. Hadjiconstantinou N.G., Garcia A.L., Bazant M.Z., He G. // J Comp Phys - 2003. - Vol. 187. - P. 274-297.
3. Plotnikov M.Yu., Shkarupa E.V. // Computers & Fluids. – 2012. - Vol. 58. - P. 102-111.
4. Garcia A. Estimating Hydrodynamic Quantities in the Presence of Microscopic Fluctuations // Commun. Appl. Math. Comput. Sci. - 2006. -Vol. 1. -P. 53-78.

### **Анализ осциллирующих решений СДУ с винеровской и пуассоновской составляющими методом статистического моделирования**

*М. А. Якунин*

В работе с помощью метода статистического моделирования исследуются вопросы влияния винеровских и пуассоновских случайных шумов на поведение осциллирующих решений систем СДУ. Для линейного осциллятора и осциллятора Ван-дер-Поля исследуется точность оценок функционалов от численных решений СДУ, полученных обобщенным явным методом Эйлера. Для линейного осциллятора получены точные выражения математического ожидания и дисперсии решения СДУ, позволяющие исследовать зависимость точности их оценок от значений параметров СДУ, размеров шага интегрирования и ансамбля моделируемых траекторий решения. Выявлена зависимость амплитуды и частоты колебаний моментов решений СДУ от параметров пуассоновской составляющей. Приводятся результаты численных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00340) и проекта Ведущие научные школы НШ-5111.2014.1.

## Секция 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА

### Использование теоремы о свертке для ускорения численного моделирования процессов соляного диапиризма

*Т. В. Абрамов, Б. В. Лунёв*

Представлен быстрый алгоритм моделирования геологического процесса – соляного диапиризма, как частного случая неустойчивости Релея – Тейлора, выражающегося во всплытии твердой каменной соли через более плотные породы в геологическом масштабе времени. Алгоритм основан на известном аналитическом решении задачи о полупространстве со свободной поверхностью [1]. Решение представляет собой свертку функции Грина с правой частью уравнения – распределением плотностной неоднородности. Авторам удалось его оптимизировать с помощью теоремы о свертке и быстрого преобразования Фурье (БПФ), что кардинально снизило вычислительную сложность по сравнению с прямым расчетом свертки [2]. Высокая скорость работы алгоритма имеет важное практическое значение, так как он применяется для изучения эволюции реальных соляных тел, а эти процессы в высокой степени влияют на распределение углеводородов практически во всех нефтегазоносных провинциях [3].

Алгоритм реализован с использованием программной библиотеки cuFFT для параллельного расчета БПФ на графических ускорителях (GPU) компании NVIDIA с помощью технологии параллельных вычислений CUDA.

Работа выполнена в рамках программы VIII.73.2 фундаментальных научных исследований СО РАН.

Список литературы

1. Лунёв Б. В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости / Б. В. Лунёв // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 290. – № 1. – С. 72 – 76.
2. Лунёв Б. В. Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике / Б. В. Лунёв, В. В. Лапковский // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 63–74.
3. Christopher J. Talbot, Martin P. Jackson. Salt Tectonics // Scientific American. 1987. V. 257, No. 2. P. 70-79.

### О фундаментальных проблемах электродинамики естественного электромагнитного поля и некоторых лабораторных экспериментов

*В. В. Аксенов*

В докладе обсуждаются следующие физические проблемы.

1. Проблема наличия непотенциального магнитного поля в непроводящей атмосфере Земли (эффект Ван Влейтен – Беньковой).
2. Проблема наличия в атмосфере вертикального к Земле электрического поля при отсутствующем электрическом токе через атмосферу (эффект Четаева).
3. Проблема динамо-возбуждения магнитного поля на Земле (эффект Лармора).
4. Проблема векторного потенциала (эффект Фейнмана).
5. Эффект Ааронова – Бома.
6. Проблема самовозбуждения магнитного поля в "бублике" токамака (эффект Аксенова).
7. Проблема наличия краткосрочного предвестника землетрясений в физических полях (эффект Алексеева – Аксенова).

Список литературы

1. Аксенов В.В. Электродинамика тороидальных магнитных полей в приложениях. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ, 2014, 152 с.
2. Аксенов В.В. Моделирование тороидальных и полоидальных электромагнитных полей // Математическое моделирование, 2014. Т.26, №5, с. 3-24.
3. Аксенов В.В. Электромагнитное поле Земли. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ. 2010, 266 с.

### **О пределах применимости теоремы Аксенова**

*В. В. Аксенов*

В [1, 2] опубликовано доказательство теоремы о некоторых соленоидальных векторных полях в области с регулярной границей, восстановить которые можно с помощью одной скалярной функции при соблюдении некоторых предварительных условий. Эти условия определяют математические пределы применимости названной теоремы, тогда как физические пределы применимости необходимо определить. В докладе показано, что физические пределы определяются при наличии в области с регулярной границей тороидальных электрических токов, тороидальных и полоидальных электромагнитных полей, создаваемых этими тороидальными токами. Такая ситуация имеет место на Земле в наблюдаемом естественном электромагнитном поле [2].

Список литературы

1. Аксенов В.В. О некоторых соленоидальных векторных полях в сферических областях // Дифференциальные уравнения, 2012, том 48, №7, с. 1056-1059.
2. Аксенов В.В. Введение в геомагнетизм. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2012.- 132 с.

### **Распознавание форм тел в нерегулярном трехмерном облаке точек**

*К. С. Алсынбаев*

Выбран способ представления тел как совокупности или пересечения тетраэдров, имеющих вершины в уплотнениях облака. На первом шаге проводится кластеризация облака с критерием максимального расстояния между точками, что обеспечивает идентификацию распознаваемых тел и ограничение объема вычислений основного алгоритма. Главной проблемой задач распознавания форм тел в нерегулярных облаках точек является огромный и быстро растущий от количества точек объем вычислений. В качестве решения предложен переход к вычислениям на сетке, используя возможность локализации основных расчетов в области тестируемого узла сетки. Предложены также несколько оптимизирующих подходов, в частности, заполнение тетраэдров на основе быстрых дифференциальных алгоритмов Брезенхэма.

Результатом работы алгоритмов являются воксельные модели тел, обеспечивающие вычисление их характеристик и дальнейший анализ. Для визуализации оболочки тела генерируется граневое представление алгоритмом marching-cubes.

Работа входит в разработку программного обеспечения обработки данных микросейсмического мониторинга.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-07-00699).

### **Алгоритм разделения наложенных импульсов выходного сигнала сцинтиллятора BGO 50x150 мм**

*Э. В. Арбузов, Е. В. Гайслер*

Разработан алгоритм, осуществляющий обработку экспериментальных данных, полученных сцинтиллятором BGO 50x150 мм с шагом дискретизации 4 нс. Предложенный метод позволяет решать задачи разделения наложенных импульсов в сигнале, определения энергетических параметров импульса, а также сжатия исходных данных. Метод основан на математической модели сцинтилляционного детектора, предложенной в работе [1] и применяемой в [2] для совершенствования цифровых методов одновременной регистрации различных типов ядерного излучения от детекторов ионизирующего излучения.

Алгоритм может быть использован в новых модификациях спектрометрических скважинных приборов, использующих частоту дискретизации входного сигнала более 10 МГц ([3]), которые в отличие от старых интегральных модификаций дают намного большую информативность.

## Список литературы

1. А. В Кочергин. Цифровая обработка сигнала сцинтилляционного детектора CsI(Tl.) сигнальным процессором TMS320C2812 // Наукові праці [Чорноморського державного університету імені Петра Могили]. Сер.: Техногенна безпека. - 2011. - Т. 163, в. 151. - С. 59-62. [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Npchdub\\_2011\\_163\\_151\\_15.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Npchdub_2011_163_151_15.pdf).
2. А. В Давыдов. HYPERLINK “[http://www.actualresearch.ru/nn/2010\\_3/Article/physics\\_maths/davydov.htm](http://www.actualresearch.ru/nn/2010_3/Article/physics_maths/davydov.htm)”Идентификация сигналов от сцинтилляционных детекторов HYPERLINK “[http://www.actualresearch.ru/nn/2010\\_3/Article/physics\\_maths/davydov.htm](http://www.actualresearch.ru/nn/2010_3/Article/physics_maths/davydov.htm)”ионизирующего излучения // Электронное научное издание "Актуальные инновационные исследования: наука и практика". 2010 год, № 3. [http://www.actualresearch.ru/nn/2010\\_3/Article/physics\\_maths/davydov.htm](http://www.actualresearch.ru/nn/2010_3/Article/physics_maths/davydov.htm)
3. А. А .Винокуров, В. В. Серебрянский, И. В. Ильин, А. Н. Фисенко, К. Г. Пенязь. Применение новых технологий в аппаратуре спектрометрического каротажа. <http://www.tpg.ru/main.php?eng=HYPERLINK> “<http://www.tpg.ru/main.php?eng=&pid=85&id=97>”&HYPERLINK “<http://www.tpg.ru/main.php?eng=&pid=85&id=97>”p id=85HYPERLINK “<http://www.tpg.ru/main.php?eng=&pid=85&id=97>”&HYPERLINK “<http://www.tpg.ru/main.php?eng=&pid=85&id=97>”id=97a

### **Reconstructing an initial tsunami waveform by the sea level data inversion for Solomon Islands tsunami of the 6<sup>th</sup> February 2013**

*T. A. Voronina, A. Romanenko*

The inverse problem to infer the initial water displacement in the tsunami source area using water level records is the so-called ill-posed problem. The developed numerical inversion technique based on the least square inversion and a truncated SVD approach is here described. The tsunami wave propagation is considered within the scope of the linear shallow-water theory. The quality of the inversion is evaluated by relative errors of the tsunami source reconstruction. The solution obtained is a projection of the exact solution onto a linear span of the  $r$  first right singular vectors corresponding to the largest singular values of a compact operator of the direct problem. Thus, the method presented allows one to control the instability of the numerical solution and to obtain an acceptable result in spite of the ill-posedness of the problem. The number  $r$  depends on the rate of decreasing a singular spectrum of the resulting matrix, which is tightly bounded with the parameters of the observational system. Hence, analyzing the singular spectrum of the matrix obtained during numerical calculations one can estimate the future inversion by a certain observational system that will allow offering more effective disposition for the recorders by precomputations. Results of numerical experiments are presented in the case study of Solomon Islands tsunami of 6th February 2013.

## References

1. V. V. Voronin, T. A. Voronina and V. A. Tcheverda, : Inversion method for initial tsunami waveform reconstruction, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 1251-1263, doi:10.5194/nhess-15-1251-2015, 2015.
2. M. M Lavrentiev, A. A. Romanenko, K. F. Lysakov. Modern Computer Architecture to Speed-Up Calculation of Tsunami Wave Propagation //Proc. of the Eleventh (2014) Pacific/Asia Offshore Mech. Symp. Shanghai,

### **Апостериорные алгоритмы в обратных задачах геофизики**

*Г. М. Воскобойникова, М. С. Хайретдинов*

В настоящее время мониторинг, прогнозирование и предотвращение стихийных бедствий и техногенных катастроф относятся к числу приоритетных проблем. Многие из них связаны с геофизическим мониторингом природных и техногенных событий и предшествующих им геодинамических процессов. К таким событиям относятся землетрясения, извержения вулканов, лунные и солнечные приливы, оползни, падения небесных тел, карьерные взрывы, вызывающие техногенные землетрясения и др. Мониторинг имеет несколько последовательных этапов, в том числе записи откликов на события и измерения основных параметров, таких как времена пробега сейсмических волн или исходных сигналов. На заключительном этапе решаются обратные задачи определения географического местоположения (координаты) и времени события. Проблема определения геометрических параметров подготовки к катастрофическим событиям еще более сложная. Популярный метод решения обратной задачи является метод наименьших квадратов на основе простых расчетов. В то же время этот метод является чувствительным к ошибкам точности измерения в исходных данных, что свидетельствует о его ограниченности. Таким образом, важно повысить точность оценки пара-

метров волн в шумах. В данной статье предложен новый подход, который по сравнению с известными методами обработки статистических данных обеспечивает более высокую точность измерения времен прихода сейсмических волн и одновременного выделения их форм. Этот подход основан на апостериорных алгоритмах дискретной оптимизации. Представлены результаты численных экспериментов по оцениванию точности и помехоустойчивости данного алгоритма.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-07-00518, 15-07-10120К).

Список литературы

1. М. С. Хайретдинов, О. К. Омельченко, Ю. И. Родионов. Автоматизированная технология локации сейсмического источника. Тр. Межд. конф. "Математические методы в геофизике", ч. II, Новосибирск, 2003. С. 529-535.
2. М. С. Хайретдинов, Г. М. Воскобойникова, Г. Ф. Седухина. Информационная технология сейсмолокации импульсных источников. Вестник национального ядерного центра республики Казахстан (Вестник НЯЦ РК), вып. 3, 2010. С. 32-39.
3. A. V. Kel'manov, B. Jeon A posteriori joint detection and discrimination of pulses in a quasiperiodic pulse train // IEEE Trans. Signal Processing. 2004. V. 52, N 3. P. 1-12.
4. G. M. Woskoboynikova. Determination of the arrival times of the seismic by the dynamic programming method // Proceedings of 9th Korean-Russian International Symposium on "Science & Technology" (KORUS 2005). – Novosibirsk: NSTU, 2005. – P. 734-737.

### **Эффективный алгоритм моделирования сейсмических волн в окрестности первых вступлений**

*А. А. Дучков, А. С. Сердюков*

Во многих алгоритмах обработки данных сейсморазведки возникает прямая задача моделирования распространения упругих колебаний. Часто необходимы лишь времена и волновые формы первых вступлений. Эта задача, как правило, решается в рамках геометрической сейсмологии. Данный подход имеет ряд известных ограничений, связанных с использованием высокочастотной аппроксимации. Альтернативным подходом является численное решение волновых уравнений. В этом случае проблемой является время и вычислительные ресурсы, необходимые для расчетов. Предлагаемый в работе метод моделирования сейсмических волн основан на комбинировании двух численных методов. Во-первых, проводится расчет времен пробега (положение фронтов) волн на основе конечно-разностного решения уравнения эйконала [1]. Во-вторых, уравнения упругости решаются методом конечных разностей только в окрестности найденного фронта волны [2]. Так как интегрирование уравнений упругости проводится только в небольшой полосе, то на это требуется существенно меньше времени и ресурсов оперативной памяти.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-05-00862 А).

Список литературы

1. J. Vidale Finite-difference calculation of travel times // Bulletin of the Seismological Society of America 1988, V.78, iss.6. P. 2062-2076.
2. J. Virieux [1986] P-sv wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method // Geophysics 1986, V.51, iss.4. P. 889-901.

### **Решение уравнения Гельмгольца на основе комбинирования различных численных методов с использованием декомпозиции области**

*А. Ф. Зайцева, К. В. Воронин, В. В. Лисица*

В данной работе представлен алгоритм комбинирования псевдоспектрального метода [1] и разрывного метода Галеркина для решения двумерного уравнения Гельмгольца. Псевдоспектральный метод является вычислительно эффективным для широкого класса моделей среды, однако наличие сложной топографии свободной поверхности существенно снижает скорость сходимости алгоритма. По этой причине в данной работе предлагается использование этого метода в глубинной части



модели, в то время как вблизи свободной поверхности применяется разрывный метод Галеркина. Комбинирование этих двух методов реализуется с помощью метода декомпозиции области.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов: 13-05-00076, 13-05-12051, 14-05-93090, 14-05-00049, 15-05-01310, 15-35-20022, 14-01-31340, 15-55-20004).

Список литературы

I. D. Neklyudov, I. Silvestrov and V Tcheverda. A Helmholtz iterative solver with semianalytical preconditioner for the frequency domain full waveform inversion// SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2010. P. 1070-1074.

### **Математическое моделирование возбуждения и распространения магнитоэлектроакустических колебаний в скважинных условиях в присутствии обсадной колонны и расположенной за ней пористой водонасыщенной среды**

*Ш. Х. Имомназаров, В. Н. Доровский, А. А. Михайлов*

Работа касается важной проблемы – измерения в скважинных условиях электропроводности формации, расположенной за обсадной колонной. Известные индукционные скважинные приборы не способны измерить электропроводность в этом случае, поскольку переменное электромагнитное поле поглощается в колонне. Идея настоящего метода сводится к возбуждению электромагнитного поля непосредственно электрическим током, протекающим по колонне. Такое поле за колонной возбуждает электроакустические колебания, которые фиксируются акустическими датчиками, расположенными в скважине. Амплитуды электроакустического колебания зависят от электропроводности формации, в результате чего появляется возможность измерения электропроводности формации в скважинных условиях.

В работе представлена теория электроакустических колебаний в пористых водонасыщенных средах, позволяющая анализировать электрокинетические коэффициенты в формации по приходящим акустическим волнам на сенсоры, расположенные в скважине на поверхности обсадной колонны. Построен численный алгоритм решения поставленной задачи на основе разностной схемы второго порядка по пространственным координатам и спектрального метода Лагерра по временной координате.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00689), грантом Президента РФ НШ-5666.2014.5

### **Применение разрывного метода Галеркина для решения задачи Дарси**

*Н. Б. Иткина, С. И. Марков*

Математические модели фильтрационных процессов, таких как: движение нефти и природного газа в подземных пластах, миграция влаги в плодородных почвах учитывают движение жидкости по сложной системе сообщающихся каналов. Одна из наиболее часто используемых эффективных моделей, описывающих движение жидкости в пористой среде – это модель Дарси.

В данной работе предлагается оригинальная вариационная постановка на основе разрывного метода Галеркина с использованием специальных лифтинг – операторов для повышения устойчивости дискретного аналога. Разработанная вычислительная схема верифицирована на классе модельных задач. Приводятся результаты вычислительных экспериментов на классе задач, приближенных к реальным: моделирование процесса фильтрации в областях с тензорным коэффициентом проницаемости с наклонными слоями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований ОФИ-М 13-05-12031.

### **Масштабируемая параллельная реализация алгоритма 3D моделирования распространения сейсмических волн на гибридном кластере**

*Д. А. Караваев, И. М. Куликов, А. А. Якименко*

В работе описывается масштабируемая параллельная реализация численного метода для 3D моделирования сейсмических полей. Решается система уравнений динамической теории упругости,

представленная в терминах скоростей смещений и компонент тензора напряжений. Используется трехмерная декомпозиция и разностный метод [1]. Разработан масштабируемый параллельный алгоритм для использования гибридных кластеров с графическими процессорами. Такая реализация использует MPI и CUDA для выполнения вычислений на GPU. Представлены результаты изучения исполнения параллельного алгоритма на GPU кластере ССКЦ СО РАН. Разработанная технология, включающая математический метод и эффективную параллельную реализацию, может иметь приложение для параллельных вычислений на других вычислительных устройствах гибридных кластеров. Полученное ускорение является многообещающим подходом для решения больших задач и использования сотен и тысяч вычислительных ядер высокопроизводительных кластеров [2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-07-832, 14-05-867, 15-07-06821, 15-31-20150 и МОН РК 1760/ГФ4).

Список литературы

1. J. Virieux P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method // *Geophysics*. Volume 51. Number 4. 1986. pp. 889-901.
2. I. Chernykh, B. Glinskiy, I. Kulikov, M. Marchenko, A. Rodionov, D. Podkorytov, D. Karavaev.: Using Simulation System AGNES for Modeling Execution of Parallel Algorithms on Supercomputers // *Computers, Automatic Control, Signal Processing and Systems Science. The 2014 Int. Conf. on Applied Mathematics and Computational Methods in Engineering*. pp. 66-70.

### **Верификация скоростных моделей земной коры с применением математического моделирования и методов активной сейсмологии**

*В. В. Ковалевский, А. Г. Фатьянов, Д. А. Караваев, Ц. А. Тубанов*

В докладе рассмотрена задача верификации скоростных моделей земной коры на основе применения математического моделирования и методов активной сейсмологии. Рассматриваются две скоростных модели земной коры, полученные для юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных областей Монголии на близких профилях в экспериментах BEST (Baikal Explosion Seismic Transect) и PASSCAL (Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere). Приведены результаты математического моделирования полных волновых полей для этих моделей и данные глубинных вибросейсмических зондирований, проведенных ИВМиМГ СО РАН и ГИН СО РАН в этом регионе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-07-06821-а, 14-07-00832-а).

Список литературы

1. Г. И. Татков, Ц. А. Тубанов, А. Д. Базаров, В. В. Толочко, В. В. Ковалевский, Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк. Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий // *Отечественная геология*. – 2013. – №3. – С. 16-23.

### **Моделирование подвижной морской подповерхностной геоэлектрической установки с амплитудно-фазовыми измерениями**

*А. В. Мариненко, М. И. Эпов*

Использование подповерхностных установок возможно в случае их слабой чувствительности к слою морской воды и, одновременно, при достаточном количестве информации в измеренном сигнале для выделения нефтегазовых залежей и определения их геометрических характеристик и удельной электропроводности. Вспомним, каким образом избавляются от экранирующего эффекта в скважинной геофизике [1]. При геофизических исследованиях в скважинах установка (зонд) находится в среде, заполненной однородным проводящим буровым раствором. Еще в 70-е годы прошлого века для скважинных моделей были получены приближенные выражения, описывающие ЭДС от малого токового витка. Воспользовавшись аналогией с задачей каротажа и методом получения приближенных выражений, можно записать выражение для расчета ЭДС на поверхности слоя горизонтально-однородной морской воды, подстилаемого проводящим полупространством. В качестве установки в такой задаче будет выступать изолированный кабель с двумя приемниками, расположенными по

одну сторону от источника. Количество необходимых точек измерений составляет около 100 положений установки (при шаге 10 м) над объектом, представляющим типичную антиклинальную ловушку. В качестве численного метода целесообразнее всего использовать векторный метод конечных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-05-12031-офи\_м).

Список литературы

1. М. И. Эпов, Ю. Н. Антонов. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство // Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Издательство СО РАН, 2000, 122 с.

### **Параллельная реализация алгоритма сейсмической томографии для вычислительных систем с распределённой памятью**

*А. А. Никитин, А. С. Сердюков, А. А. Дучков*

Данная работа посвящена разработке и реализации параллельного алгоритма сейсмической томографии для вычислительных систем с распределённой памятью. Метод сейсмической томографии используется при обработке региональных и глобальных сейсмологических данных, в разведочной и инженерной сейсморазведке для построения скоростной модели геологических структур по временам пробега сейсмических волн.

В работе реализуется следующая схема сейсмической томографии. С помощью Fast Sweeping метода [1] численного решения уравнения эйконала вычисляются времена первых вступлений сейсмических волн для предполагаемой скоростной модели исследуемой среды. Для решения обратной задачи строится разреженная томографическая матрица на основе метода "толстых лучей" [2], связывающая вектор невязок между наблюдаемыми и расчетными временами первых вступлений с вектором уточнения модели. При решении полученной системы линейных алгебраических уравнений используется регуляризация на основе метода усеченного сингулярного разложения [3].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-05-06752) и грантов компании ВР для молодых ученых.

Список литературы

1. H. A. Zhao fast sweeping method for eikonal equations // Mathematics of computation. 2005. V. 74, iss. 250. P. 603–627.

2. S. Husen, E. Kissling Local earthquake tomography between rays and waves: fat ray tomography // Physics of the earth and Planetary Interiors. 2001. V. 123, iss. 2. P. 127-147.

3. В. А. Чеверда, В. И. Костин. R-псевдообратный для компактного оператора // Сибирские электронные математические известия. 2010. Т. 7. С. 258-282.

### **Приближенное решение обратной задачи сейсмологии на основе метода медленно меняющихся амплитуд**

*Ю. А. Орлов*

Параметры неоднородной среды представляются в виде суммы параметров: известных (для референтной среды) и малых неизвестных добавок. Целью является определение этих неизвестных параметров среды по зарегистрированному волновому полю. Считаем, что набор решений прямой задачи для референтной модели известен. При некотором заданном положении источников волн решение задачи для неизвестной среды представляется в виде суммы референтных решений с коэффициентами (амплитудами), которые медленно меняются по одной из координат. На величину самих амплитуд ограничения не накладываются. После отбрасывания малых членов уравнения и усреднения по ограниченному дискретному объему среды уравнения распространения волн в частных производных сводится к системе обыкновенных уравнения первого порядка с постоянными коэффициентами. Постоянные коэффициенты являются интегральными параметрами от неизвестных параметров среды. Решение обратной задачи сводится к определению интегральных параметров из системы обыкновенных уравнений и далее вычисление параметров среды. В некоторых случаях ин-

тегральные параметры вычисляются через амплитуды волн минуя решение системы обыкновенных уравнений. Даются примеры решений.

### **Высокопроизводительные алгоритмы решения задачи поиска предельных границ открытых карьеров**

*Д. В. Петров, В. М. Михелев*

В процессе проектирования открытой разработки недр задача определения конечных контуров карьера является одним из ключевых этапов. Ее решение позволяет оценить предельные значения получаемой прибыли от разработки месторождения при текущей цене на полезные компоненты [1]. При нахождении границ карьера необходимо учитывать пространственное распределение компонентов полезных ископаемых и принятых устойчивых или технологически допустимых углов откосов бортов. Основой для выполнения расчетов является блочная модель месторождения. Вполне закономерно, что чем более точной является блочная модель рудного месторождения, тем более вычислительно сложным является процесс расчетов [2].

В работе показана возможность применения различных методов глобальной оптимизации для решения задачи определения граничных контуров карьеров. В частности, рассматриваются метод частичного перебора (метод плавающего конуса) и генетический алгоритм, проводится их сравнительный анализ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-47-03029 р\_центр\_а).

Список литературы

1. Д. В. Петров, В. М. Михелев Моделирование карьеров рудных месторождений на высокопроизводительных гибридных вычислительных системах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2014. Т. 3. № 3. с.124-129.

2. В. М. Михелев., П. В. Васильев., Д. В. Петров. Суперкомпьютеры, как средства моделирования граничных контуров карьеров рудных месторождений // Вопросы радиоэлектроники. Серия "Электронная вычислительная техника (ЭВТ)" Выпуск 1, Москва 2013. с. 5-10

### **Подходы к составлению трехмерной геоэлектрической модели для численных расчетов**

*А. М. Санчаа, И. В. Суродина, А. А. Власов, Н. Н. Неведрова, А. А. Сафиулина*

Для повышения надежности результатов инверсии данных нестационарных электромагнитных зондирований (ЗС) и метода сопротивлений предлагается проводить трёхмерное моделирование зарегистрированного сигнала. В этой работе создание трёхмерной модели по данным ЗС будет осуществляться с помощью полигонов Вороного. Полигоны Вороного позволяют разбить исследуемое пространство на многоугольники, образующие сетку пространственного распределения пикетов. В центре каждого многоугольника находится ровно один пикет. В результате действия алгоритма одномерные модели распространяются на площадь всего полигона, образуя единую трёхмерную модель среды. В настоящее время составление трёхмерных моделей происходит только тогда, когда сетка распределения пикетов в пространстве равномерная. Созданное программное средство, с помощью полигонов Вороного, позволит автоматически составлять трёхмерные модели при неравномерном распределении сети измерений. Исходная модель среды для 3D моделирования методом сопротивлений составляется из набора усеченных треугольных призм, из которых формируются блоки с однородными электрическими параметрами. Такая конфигурация позволяет легко уменьшать или увеличивать при необходимости размеры этих блоков и соответственно их влияние на электрическое поле. Разработан и реализуется алгоритм автоматизации построения и верификации стартовой модели.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 15-35-20614 мол\_а\_вед.

## Список литературы

1. Н. Н. Неведрова И. В. Суродина, А. М. Санчаа. Трехмерное моделирование сложных геоэлектрических структур // Геофизика. – 2007. - №1. – с.36-41.

**Выбор размерности и детальности данных дистанционного зондирования Земли при кластеризации гистограммным иерархическим алгоритмом**

*В. С. Сидорова*

Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) характеризуются большим объемом, большой размерностью, сложностью и часто отсутствием априорной информации. Поэтому актуальна кластеризация, позволяющая выделять скопления данных. Применяемые к данным ДДЗ алгоритмы делятся на  $K$ -средних и гистограммные. Гистограммные, автоматически разделяющие данные по унимодальным кластерам, не требуют задания числа кластеров. Популярен быстрый алгоритм [1], предполагающий, однако снижение уровня детальности пространства данных до кластеризации. В работе [2] рассмотрена автоматизация выбора детальности. Параметром детализации является задаваемое значение предложенной автором меры отделимости кластера, поскольку критерием качества кластеризации является именно разделение кластеров. Учитывая сложность объектов, иерархический алгоритм [2] позволяет в разных частях данных автоматически находить свою предельную детальность. В настоящей работе предложено сокращать также размерность пространства данных, используя преобразование его в собственное.

Алгоритм применялся для картирования загрязнения отходами производств Омской области по восьми спектральным каналам ИСЗ “Landsat-8” (разрешение 15 м, 08.02.2014).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 13- 07- 00068) и программы № 43 Президиума РАН (проект № 32).

## Список литературы

1. P. M. Narendran and M. A. Goldberg non-parametric clustering scheme for LANDSAT // Pattern Recognition. 1977, No. 9, P. 207 -215.

2. V. S. Sidorova Detecting Clusters of Specified Separability for Multispectral Data on Various Hierarchical Levels // Pattern Recognition and Image Analysis. 2014, Vol. 24, No. 1, P. 151-155.

**Восстановление строения среды с использованием поверхностных волн на основе минимизационного подхода**

*И. Ю. Сильвестров, К. Г. Гадильшин, Д. А. Неклюдов, В. А. Чеверда*

В работе рассматривается обратная задача восстановления параметров упругой среды около свободной поверхности по зарегистрированным поверхностным волнам Рэлея, распространяющимся вдоль неё. Для решения задачи используется нелинейный метод наименьших квадратов, в рамках которого минимизируется отклонение в области пространственно-временных частот между амплитудными спектрами зарегистрированных и начисленных для пробной модели среды поверхностных волн [1]. Рассматриваемый в работе подход является модификацией более традиционного метода минимизации невязки между полными волновыми полями в пространственно-временной области. С использованием техники анализа сингулярного разложения линеаризованного оператора прямой задачи [2] в работе показано, что такая модификация обладает рядом преимуществ в рассматриваемой задаче по сравнению с традиционным подходом. В частности показано, что функция невязки обладает более широкой областью сходимости, что улучшает сходимость локальных итерационных алгоритмов и снижает требования на качество задания начальной модели. На заключительном этапе работы, полученные выводы подтверждаются на примере численного решения модельной обратной задачи.

Авторы выражают благодарность А. Бакулину, П. Голикову и М. Дмитриеву за постановку задачи и дискуссии при выполнении работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-05-31257, 14-05-00049, 15-55-20004, 15-35-20015). Расчеты проводились на ССКЦ.



## Список литературы

1. И. Мазони, Р. Бросье, Ж.-Л. Бёлль, М. Маке, Ж. Вирьё. Робастное обращение полного поля поверхностных волн // Технологии сейсморазведки. 2014. № 4. С. 48-59.
2. V. A Cheverda., F. Clement, V. G Khaidukov. and V. I. Kostin. Linearized inversion of data of multi-offset data for vertically inhomogeneous background. Journal of Inverse and Ill-posed Problems. 1998. V. 6, iss. 5. P. 453–484.

### **Моделирование влияния акустических возмущений на конвективный теплоперенос в двухфазной среде**

*К. Э. Сорокин, Ю. В. Перепечко, Х. Х. Имомназаров*

Данная работа основана на двухскоростной модели однотемпературной, неравновесной по давлению в фазах, насыщенной гранулированной среды [1]. В работе решаются задачи численного моделирования импульсного воздействия, генерируемого малым источником, на конвективный теплоперенос в такой двухфазной среде. Алгоритм численной реализации модели построен на методе контрольного объема [2] с модифицированным, для повышения устойчивости процедуры расчета согласованных полей скоростей и давлений, алгоритмом SIMPLE и с учетом в нем сжимаемости [3]. Приведены результаты верификационных и модельных расчетов как тестовых, так и прикладных геологических задач. Расчеты показывают возможность возбуждения и управления режимами конвекции в насыщенной гранулированной среде посредством импульсного воздействия различной частоты и интенсивности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-01-00689а, 12-05-00625а) и гранта Президента РФ НШ-5666.2014.5.

## Список литературы

1. Yu. V. Perepechko, K. E. Sorokin Two-velocity dynamics of heterophase media // Journal of Engineering Thermophysics. 2013. V. 22, iss. 3. P. 241-246.
2. С. В. Патанкар. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоиздат, 1984.
3. К. Э Сорокин, Ю. В Перепечко. Конвекция в двухфазной сжимаемой среде в акустическом поле // Естественные и технические науки. 2014. № 9. С. 40-46.

### **Применение графических процессоров для моделирования показаний зондов ВИКИЗ**

*И. В. Суродина*

Математическое моделирование показаний зондов ВИКИЗ методом конечных разностей сводится к решению уравнений с комплексной неэрмитовой матрицей большой размерности. Учёт биополимерных буровых растворов в скважинах [1] приводит к увеличению размеров сеток и, как следствие, размерности матриц. Существенно ускорить существующие двумерные и особенно трёхмерные программы [2] позволяет перенос всех расчётов на графические процессоры.

В новом варианте программ для решения СЛАУ используется метод сопряжённых ортогональных сопряженных невязок (COCR) с авторским предобуславливателем [3], который не требует особых затрат на построение и является полностью параллельным. Данный предобуславливатель хорошо зарекомендовал себя при моделировании зондов постоянного тока [2] и в рассматриваемом случае также показал высокую эффективность.

## Список литературы

1. И. В. Суродина, Эпов М.И. Моделирование диаграмм высокочастотного электромагнитного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором. //НТВ Каротажник, Тверь: Издательство АИС, 2013, вып. 5 (227), с.60-75
2. И. В. Суродина, Г. В. Нестерова. Трёхмерное численное моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах // "Геомодель 2014", – 4 с. DOI: 10.3997/2214-4609.20142232, <http://earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=77926>
3. I. V. Labutun, I. V. Surodina. Algorithm for Sparse Approximate Inverse Preconditioners in Conjugate Gradient Method // Reliable Computing (Interval Computations) Journal <http://interval.louisiana.edu/reliable-computing-journal/volume-19/reliable-computing-19-pp-120-126.pdf>

## **Моделирование 2D-упругих волн в средах с криволинейной свободной поверхностью при помощи пошагового метода Лагерра**

*П. А. Титов*

Для численного моделирования распространения упругих волн в 2D неоднородных упругих средах с криволинейной свободной поверхностью используются метод конечных разностей по пространству и пошаговый метод Лагерра по времени. Также для наилучшего согласования с границей области используются адаптивные разностные сетки.

Как было показано в работе [1], пошаговый метод Лагерра, позволяет проводить численное моделирование динамических задач для больших времен. В работе [2] показана возможность применения метода для моделирования волновых полей.

Разработан параллельный алгоритм и создана параллельная программа для численного моделирования распространения упругих волн в сложно построенных средах. Выполнена серия тестовых расчетов на многоядерных вычислительных системах, для различных моделей упругих сред со сложной геометрией свободной поверхности, проведены сравнительные тесты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 12-01-00231), а также программы фундаментальных исследований РАН №4 проект 4.9. "Модельные и экспериментальные исследования вулканических структур методами активной и пассивной сейсмологии".

Список литературы

1. Г.В. Демидов, В.Н. Мартынов. Пошаговый метод решения эволюционных задач с использованием функций Лагерра // Сибирский журнал вычислительной математики. 2010 Том 13, №4, стр. 413-422
2. П. А. Титов. Алгоритм и программа моделирования 2D-волновых полей в областях с криволинейной свободной поверхностью // Материалы конференции "Научный сервис в сети Интернет - 2014" Новороссийск, Абрау-Дюрсо, 21-26 сентября 2014, стр.446-455.

## **Многофакторная модель взаимодействия сопряженных геофизических полей в экологоохранном прогнозировании**

*М. С. Хайретдинов, Г. М. Воскобойникова, Г. Ф. Седухина*

В связи с решением комплексной проблемы оценивания экологических рисков для окружающей природной среды, порождаемых различными природными и техногенными источниками, рассматривается многофакторная задача оценивания влияния различных метеопараметров, а также земного покрова на пространственно-временные характеристики распространения инфразвуковых акустических полей. В настоящее время эта проблема остается недостаточно изученной прежде всего в экспериментальном плане из-за отсутствия маломощных в сравнении со взрывами источников инфразвука, обладающих высокими метрологическими характеристиками. На сегодня в качестве таких источников используются сейсмические вибраторы, обеспечивающие высокую повторяемость экспериментов при изучении процессов распространения сейсмических и акустических волн с учетом влияния различных внешних факторов [1, 2]. Результаты настоящей работы, полученные на основе численного моделирования и анализа данных экспериментов, опираются на вибрационный метод прогнозирования экологических рисков, порождаемых мощными техногенными и природными взрывами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 10-07-00387, 14-07-00518, 15-07-10120).

Список литературы.

1. V. V. Gubarev, V. V. Kovalevskii, M. S. Khairtdinov, S. A. Avrorov, G. M. Voskoboinikova, G. F. Sedukhina, and A. A. Yakimenko. 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. Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф., Ковалевский В. В., Павлов А. Ф. Изучение метеозависимой фокусировки акустических волн с помощью сейсмического вибратора и взрывов // Периодический Научно-технический журнал Национального ядерного центра республики Казахстан. Вестник НЯЦ РК. Курчатов, Казахстан, 2014. Вып.2. С. 129-137

### **Interaction of seismic waves with the microstructure of cavernous fractured reservoirs**

*V. Tcheverda, V. Pozdnyakov, G. Reshetova, A. Merzlikina, V. Shilikov, V. Lisitsa*

The process of seismic waves' propagation through 3D heterogeneous multiscale media is analyzed by means of finite-difference simulation using locally refined grids. In order to do reliable conclusion on the base of results of this simulation the digital geological model (3D distribution of P- and S-wave propagation velocities and density) is developed on the base of real life observations: 3D routine seismic processing, detailed well-logging analysis and laboratory study of core samples. Careful analysis of results of numerical simulation reveals intensive multiple scattering in the fluid saturated areas which are clearly observed in images of scattering energy. The same structures are presented in real field images of scattering energy and correlate with high permeability of deep wells.

### **Трёхмерное численное моделирование конвекции в верхней мантии Земли под Евразийским континентом в сферических координатах**

*В. В. Червов*

Выполнено численное моделирование тепловой конвекции с применением трехмерной численной модели конвекции в мантии Земли, основанной на системе уравнений Навье – Стокса в приближении Обербека – Буссинеска и геодинатическом приближении. Построены температурные поля, найдены скоростные режимы конвективных течений под внутриконтинентальной областью Евразии, в которую входят в виде литосферных блоков Русская платформа, Западно-Сибирская плита, Сибирская платформа, Центрально-Азиатский складчатый пояс, Тувинский комплекс микрократонов, Тарим, Китайские платформы, Индийская и Аравийская плиты.

### **Анализ систем источник – приемник в скважинной электроразведке**

*Э. П. Шурина, Д. А. Архипов, М. И. Энов*

Одной из основных проблем скважинного каротажа является анализ зондовых систем, ориентированных на исследование околоскважинного пространства. Технологические особенности: необсаженная или обсаженная скважина при дискриминации системы источник – приемник приводит к чрезвычайно разномасштабным и электрофизически неоднородным фрагментам области моделирования. В данной работе предложена модифицированная векторная конечноэлементная аппроксимация уравнения Гельмгольца, обеспечивающая эффективное решение данного класса задач для двух типов источников электромагнитного поля: соленоидальный и тороидальный источник.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований ОФИ-М 13-05-12031.

### **Восстановление верхней части разреза на основе данных поверхностных волн**

*А. В. Яблоков, А. С. Сердюков, А. А. Дучков, П. А. Дергач*

При решении многих прикладных задач возникает необходимость восстановления скоростного строения верхней части геологического разреза (ВЧР) глубиной от десятков до нескольких сотен метров. Восстановление ВЧР сейсмическими методами широко используется при решении многих инженерных задач, связанных, например, со строительством. В ряде ситуаций неверное восстановление ВЧР сильно сказывается на качестве обработки сейсморазведочных данных для больших глубин.

В данной работе рассматриваются методы инверсии, основанные на анализе дисперсионных кривых поверхностных волн [1]. Нами была разработана новая реализация рассматриваемого метода инверсии на основе быстрого алгоритма построения дисперсионной кривой для основной моды волны Рэлея и проведены численные эксперименты на синтетических и реальных данных.

Список литературы

1. Solano C. A. P. Two-dimensional near-surface seismic imaging with surface waves: alternative methodology for waveform inversion// PhD thesis. – Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.

## **Секция 5. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

### **Численная модель прогноза погоды в полярной области**

*И. Г. Авдеев, Р. Б. Зарипов, И. В. Колотовкин, В. Н. Крупчатников*

Представлена численная модель прогноза погоды (на основе версии модели WRF-3.4), которая предназначена для исследования и прогноза динамики погоды в Арктическом регионе Евразии/Сибири, полярно-оптимизированная версия WRF включает модифицированную модель поверхности Noah и модель морского льда, что позволяет находить толщину морского льда и глубину снега на поверхности морского льда.

В настоящее время модель готовится к эксплуатации в оперативном режиме для прогноза динамики погоды в Арктике и, в частности, экстремальных погодных явлений в этом регионе. Для подготовки начальных условий, используется система усвоения метеорологических данных 3D-VAR с учетом усвоения спутниковых данных.

Приводится анализ результатов тестовых прогнозов, результаты выкладываются на сайт института <http://sibnigmi.ru>. Модель также будет использоваться для исследования свойств климатической системы полярных областей.

### **Математическое моделирование динамики газовых примесей и аэрозолей в тропосфере и стратосфере**

*А. Е. Алоян, А. Н. Ермаков, В. О. Арутюнян*

Рассматриваются процессы формирования сульфатных аэрозольных частиц в тропосфере и нижней стратосфере и их влияние на формирование облачности в верхней тропосфере над морем, а также на формирование различных типов полярных стратосферных облаков (ПСО) в стратосфере. Используются данные о выбросах антропогенного ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ ) и биогенного ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ) происхождения. Сульфатные аэрозольные частицы со временем растут из-за кинетических процессов конденсации и коагуляции и становятся ядрами конденсации. Далее моделируются процессы влажной конвекции и формирование облачности над морем с использованием атмосферных ядер конденсации, включающих  $\text{NaCl}$  (до высоты 1.5 км) и сульфатные частицы (выше 3 км). Показана зависимость сульфатных частиц в процессе образования облачности.

Построена новая математическая модель глобального переноса газовых примесей и аэрозолей в атмосфере и ПСО. Решение задачи формирования ПСО осуществлялось с привлечением пространственной модели формирования частиц сульфатных аэрозолей с учетом химических и кинетических процессов. Предложены новые кинетические уравнения, описывающие изменчивость веществ, находящихся в газовой и конденсированной фазах с учетом спектра размеров частиц.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-05-00992, 15-05-01285).

### **Концепция разработки системы мониторинга качества подземных вод**

*Ж. Т. Бельдеубаева, С. Ж. Рахметуллина, Е. М. Турганбаев, В. С. Кривых*

В статье описывается общий подход к проектированию и разработке информационно-аналитической системы мониторинга подземных вод Республики Казахстан.

В работе изложены результаты предпроектного обследования состояния проблемы, проведенного с целью определения методов анализа и прогнозирования состояния подземных вод, определения задач, решение которых необходимо для разработки информационно-аналитической системы. В статье описаны методы моделирования процесса загрязнения подземных вод, основанные на уравнениях переноса веществ в жидкой среде.

Также в статье приводятся основные требования к функционированию информационно-аналитической системы, этапы оценки, прогнозирования состояния подземных вод.

Материал статьи основан на результатах решения задач научного проекта, выполняемого на основе грантового финансирования (Тема 66-420-15).

Список литературы

1. Осипова М. Водные ресурсы Восточного Казахстана и их экологический статус // Актуальные проблемы современной науки, Горноалтайск: ГАСУ, 2012 Т.1, №3
2. Turganbaev E., Nugumanova A. Design of the remote access to the "Ground water of the Republic of Kazakhstan" database // International Scientific and Practical Conference "Green economy is the future of humanity", EKSTU, Ust-Kamenogorsk, May, 2014, P.1665-1677
3. Rakhmetullina S., Beldeubaeva Zh. Methods for detection and assessment of pollution groundwater // International Scientific and Practical Conference "Green economy is the future of humanity", EKSTU, Ust-Kamenogorsk, May, 2014, P. 302-312,
4. Гольдберг В.М. Рекомендации по выявлению и оценке загрязнения подземных вод, М.: Недра, 2002. С. 62

### **Фильтрация спутниковых данных измерений влажности почвы**

*Н. Н. Богословский, С. И. Ерин*

Одной из важнейших и сложнейших проблем является проблема повышения точности численного прогноза погоды. Один из способов повышения качества численного прогноза погоды является усвоение данных измерений. Все большее значение в системах усвоения данных наблюдений приобретают спутниковые данные измерений. К достоинствам спутниковых данных измерений можно отнести большую зону покрытия и высокую плотность наблюдений. Особенно это актуально для территории России, где плотность наблюдательной сети метеостанций небольшая.

Влажность почвы играет одну из важнейших ролей в формировании поверхностных потоков явного и скрытого тепла. В 1996 году показали, что ошибки в задании влажности почвы оказывают значительное влияние на качество краткосрочного и среднесрочного численного прогноза погоды и даже оказывает влияние на сезонные прогнозы [1].

Первые результаты сравнения спутниковых данных измерений влажности почвы с прямыми измерениями показали [2], что перед использованием этих данных в системе усвоения необходимо применять методы фильтрации исходных данных. В работе рассматриваются различные методы фильтрации спутниковых данных наблюдений, и проводится их сравнение с прямыми измерениями влажности почвы за 2007-2012 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-6896.2015.5.

Список литературы

1. Giard D., Bazile E. Assimilation of soil temperature and water content with isba in arpege: Some new developments and tests. // HIRLAM Newsl. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 1996. 110. 24. Pp. 10-12.
2. Bogoslovskiy N. N., Erin S. I., Borodina I. A. and Kizhner L. I. Comparison of ASCAT satellite soil moisture measurements data with in-situ measurements // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 92924P (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2075184; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2075184>

### **Моделирование изменений тропической циркуляции с помощью совместной модели динамики атмосферы и океана промежуточной сложности**

*И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников, Е. Н. Голубева, Г. А. Платов*

Исследуется реакция тропической циркуляции на климатические изменения. Известно, что океанические течения существенно влияют на тропическую циркуляцию и её отклик на климатические изменения. В большинстве моделей при расчете потоков явного и скрытого тепла и ветрового трения считается, что влияние скорости течений пренебрежимо мало.



В данной работе с помощью совместной модели исследовано влияние скорости океанических течений на изменения тропической циркуляции. Для этого в модель общей циркуляции атмосферы промежуточной сложности Planet Simulator добавлен блок, отвечающий за динамику океана.

В качестве океанического блока рассматривается глобальная модель динамики океана [1]. Модель основана на численном решении системы полных нелинейных уравнений гидротермодинамики океана, записанных в криволинейных ортогональных координатах с использованием традиционных приближений Буссинеска, гидростатики и "твердой крышки".

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-05-00480А).

Список литературы

1. Голубева Е. Н. Изучение роли температурно-соленостных аномалий в формировании режимов меридиональной циркуляции Мирового океана // Сиб.журн.выч.матем./РАН.Сиб.отд-ние.–Новосибирск, 2010, т.13, №3, с.155-167

### **Неизотермические течения воды в системах открытых русел и водотоков**

*А. Ф. Воеводин, В. С. Никифоровская*

Рассматриваются математические модели и численные методы для исследования гидрофизических процессов в озерно-речных системах [1-2]. Предполагается, что плотность воды зависит от температуры и концентрации примесей (соли). Для расчета параметров течения в речных руслах используются одномерные модели, т. е. уравнения гидродинамики и тепломассопереноса, осредненные по поперечному сечению, а для водотоков большой глубины — двумерные, осредненные по ширине поперечного сечения. Кроме того, формулируются условия сопряжения одномерных и двумерных моделей. С математической точки зрения мы получаем начально-краевую задачу для систем эволюционных уравнений, определенных на комплексе (графе). Для решения такого класса задач используются неявные разностные схемы и специальные методы решения систем линейных уравнений большой размерности с разреженными матрицами. Приводятся примеры численных расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 4.8 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

Список литературы

1. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. Комплексная математическая модель для исследования волновых процессов в проточных системах токрытых русел и водоемов // Метеорология и гидрология, 2012, № 4. С. 64-74.

2. Воеводин А.Ф., Шугрин С.М. Методы решения одномерных эволюционных систем. — Новосибирск: Наука, 1993, 368с.

### **Исследование современного состояния Северного Ледовитого океана на основе численного моделирования**

*Е. Н. Голубева, Г. А. Платов, Д. Ф. Якишина, М. В. Крайнева*

Заметное сокращение минимальной летней площади морского льда Северного Ледовитого океана (СЛО) является индикатором происходящих климатических изменений. По данным Национального Центра обработки данных снега и льда в США (National Snow and Ice Data Center, далее NSIDC), к настоящему времени абсолютный минимум площади льда в СЛО составляет 3,41 млн км<sup>2</sup> (сентябрь 2012 г.), что на 49 % ниже среднего значения за период с 1979 по 2000 г. Определяющая роль в этом процессе отводится атмосфере в связи с регистрируемым повышением приземной температуры воздуха в полярных широтах и изменением циркуляционного режима, формирующего устойчивый вынос льда за пределы Арктического бассейна. Считалось, что роль океана менее важна. Однако повышение в последние два десятилетия температуры поступающих в регион атлантических и тихоокеанских вод заставляет обратить особое внимание на состояние водных масс и циркуляцию вод СЛО, так как это является дополнительным фактором теплообмена в климатической системе. В докладе представлены результаты численного моделирования изменчивости площа-

ди морского льда и циркуляции вод СЛО с использованием данных реанализа атмосферы для периода с середины прошлого столетия по настоящее время. Результаты моделирования отражают реакцию СЛО на смену режимов циркуляции атмосферы, что проявляется в изменении траектории движения тихоокеанских и атлантических вод в поверхностном и промежуточном слоях. Показано влияние тихоокеанских и атлантических вод на распределение и толщину арктического льда.

### **Математическое моделирование в изучении природных катастроф (на примере проблемы цунами)**

*В. К. Гусяков, Ю. И. Шокин, Л. Б. Чубаров, С. А. Бейзель*

Математическое моделирование представляет собой одно из наиболее мощных и гибких средств изучения сложных природных явлений, в отношении которых постановка прямого натурального эксперимента является, как правило, невозможной. Характерным примером опасного природного явления, характеризующегося малой повторяемостью и тяжелыми последствиями, являются волны цунами, возникающие в глубоком океане при некоторых сильных подводных землетрясениях, но вызывающие основные разрушения в мелководной прибрежной зоне. В докладе рассматриваются основные подходы, используемые для описания возбуждения, распространения и набега на берег волн цунами, включая выбор физической модели среды (слой жидкости и подстилающее дно) и типов возможных движений. Обсуждаются методы верификации и тестирования численных алгоритмов, основанные на проверке законов сохранения и воспроизводимости некоторых свойств исходных дифференциальных уравнений, а также методы валидации полной модели путем сопоставления расчетных данных с результатами лабораторных экспериментов и натуральных измерений. Приводятся примеры построения полных численных моделей разрушительных цунами последнего десятилетия, включая цунами Тохоку 11 марта 2011 г. в Японии. Показывается ограниченность современных методов моделирования как в решении задачи оперативного прогноза цунами, так и при получении оценок долгосрочного цунами-риска (цунамирайонирования побережья).

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-17-00219).

### **Влияние естественных и антропогенных источников возгорания на характеристики природных пожаров**

*А. В. Елисеев, И. И. Мохов, А. В. Чернокульский*

С использованием различных версий климатической модели (КМ) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) сделаны оценки изменений характеристик природных пожаров (площади  $S_f$  и эмиссий  $CO_2$  в атмосферу  $E_f$ ) в XX-XXIII веках при учёте антропогенных воздействий в соответствии с условиями международного проекта сравнения климатических моделей CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5). В частности, для XXI-XXIII веков антропогенные воздействия учитывались согласно сценариям семейства RCP (Representative Concentration Pathways). В КМ ИФА РАН учтён вклад естественных (молниевых) и антропогенных источников возгорания. Согласно полученным результатам доминирующую роль играют антропогенные источники возгорания. В частности, на глобальном уровне доля  $S_f$ , связанная с естественными источниками, не превышает 8 %, а соответствующая доля  $E_f$  - 18 %. Для Евразии их доля не превышает 3 %. При этом вклад естественных источников возгорания в пожарную активность уменьшается с увеличением плотности населения (что отмечено при всех сценариях RCP).

### **Об одном методе оценки природно-техногенной нагрузки на окружающую среду**

*М. В. Зарецкая, А. Г. Зарецкий*

В данной работе рассматривается приближенный численно-аналитический метод исследования процессов, моделируемых смешанными граничными задачами, к которым относятся модели турбулентной диффузии [1], наиболее полно и адекватно описывающие процессы переноса субстанций (СБ) в атмосфере и водной среде. Среди многочисленных природно-климатических факторов, влияющих на перенос СБ в среде, учитываются сложное распределение физико-механических характе-

ристик среды по вертикали и разнотипность подстилающей поверхности, каждой из составляющих областей которой ставится в соответствие экспериментально определяемый параметр, характеризующий способность данного участка поверхности удерживать часть осаждающихся веществ.

Исследование смешанной граничной задачи проводится с применением теории блочных структур и дифференциального метода факторизации [2]. Для систем псевдодифференциальных уравнений развивается приближенный метод решения соответствующих интегральных уравнений, позволяющий оперативно получить результат без ущерба точности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и администрации Краснодарского края (код проекта 13-01-96504).

Список литературы

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. М.: Наука, 1982. 320 с.
2. Бабешко В.А. Дифференциальный метод факторизации для блочной структуры / В.А. Бабешко, О.М. Бабешко, О.В. Евдокимова, М.В. Зарецкая, А.В. Павлова // Докл. Академии наук. 2009. Т. 424. № 1. С. 36 – 39.

### **Математическое моделирование глобальной электрической цепи в атмосфере Земли**

*А. В. Калинин, Е. А. Мареев, Н. Н. Слюняев, А. А. Жидков*

Концепция глобальной электрической цепи (ГЭЦ) связывает воедино физические явления различной природы, имеющие отношение к атмосферному электричеству, позволяя одновременно учитывать квазистационарный ток проводимости, токи конвекции, осадков, короны и молний. Основной задачей теории ГЭЦ является определение распределения квазистационарного тока, поддерживаемого ее генераторами: грозовыми облаками, негрозовыми облаками с развитой электрической структурой, мезомасштабными конвективными системами, а также ионосферными и магнитосферными генераторами [1].

В настоящей работе исследован круг вопросов, связанных с постановками стационарных и квазистационарных задач о ГЭЦ в виде (вообще говоря, неклассических) уравнений для потенциала электрического поля с различными, в т.ч. и неклассическими, граничными условиями, доказана их корректность.

В основу численного исследования положены проекционные методы, и в качестве реализации разработаны двумерная (осесимметричная) и трёхмерная модели ГЭЦ, позволяющие определять пространственно-временное распределение потенциала. Построенные модели позволили исследовать ряд важных для физики атмосферного электричества задач о влиянии неоднородностей и возмущений проводимости и плотности стороннего тока различной природы на основные характеристики ГЭЦ [2, 3].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (договор № 14.В25.31.0023), гранта (соглашение от 27 августа 2013 г. №02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ), Минобрнауки РФ в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности в 2014–2016 г.г. (код проекта 1727).

Список литературы

1. Мареев Е.А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // УФН. 2010. Т.180, №5. С. 527–534.
2. Жидков А.А., Калинин А.В., Мареев Е.А., Слюняев Н.Н. Стационарные и нестационарные модели глобальной электрической цепи: корректность, аналитические соотношения, численная реализация // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, №3. С. 355–364.
3. Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Kalinin A.V., Zhidkov A.A. Influence of Large-Scale Conductivity Inhomogeneities in the Atmosphere on the Global Electric Circuit. J. Atmos. Sci., doi: 10.1175/JAS-D-14-0001.1 2014. V. 71, pp. 4382–4396.

### **Численные эксперименты по оценке состояния окружающей среды на основе системы усвоения данных о пассивных газовых составляющих**

*Н. В. Киланова, Е. Г. Климова, А. Н. Зудин*

В настоящее время моделирование пространственно-временного распределения пассивных газовых составляющих в атмосфере осуществляется с использованием систем усвоения данных изме-

рений. Такие системы позволяют учесть данные наблюдений о концентрации газовых составляющих для уточнения оценки концентрации, вычисленной с помощью математической модели. Одним из популярных алгоритмов усвоения данных является ансамблевый фильтр Калмана. При реализации этого алгоритма в задачах большой размерности возникает ряд вычислительных особенностей связанных с вычислением и обработкой ансамбля прогнозов по модели.

В докладе предлагаются алгоритмы усвоения данных, основанные на теории фильтра Калмана, в которых ковариационные матрицы вычисляются с помощью ансамбля прогнозов по модели. Рассматриваются два подхода к организации ансамблевого алгоритма усвоения данных: классический ансамблевый подход и подход, основанный на предположении об эргодичности по времени случайных полей ошибок прогноза. Во втором подходе при вычислении матрицы ковариаций ошибок прогноза вероятностное осреднение заменяется осреднением по времени. Свойства предложенных алгоритмов исследованы с помощью численных экспериментов с трехмерной полусферной моделью распространения пассивной примеси. В докладе приводятся результаты численных экспериментов по усвоению модельных данных.

### **Экономичный алгоритм усвоения данных, основанный на стохастическом ансамблевом фильтре Калмана**

*Е. Г. Климова*

Алгоритм фильтра Калмана в настоящее время один из самых популярных подходов к решению задачи усвоения данных наблюдений. Лидирующим направлением в работах, посвященных применению фильтра Калмана при усвоении данных, является ансамблевый подход. Ансамблевый подход позволяет вычислять матрицы ковариаций ошибок оценивания для нелинейных прогностических моделей. При реализации ансамблевого алгоритма возникает множество проблем, связанных с ограниченным числом членов ансамбля, а также с необходимостью получения ансамбля с матрицей ковариаций, соответствующей ковариациям ошибок анализа. Также как классический обобщенный фильтр Калмана, ансамблевый фильтр Калмана является технически сложно реализуемым алгоритмом из-за необходимости выполнять операции с матрицами высокого порядка. В настоящее время существует два подхода к реализации ансамблевого фильтра Калмана: стохастический, являющийся аналогом классического фильтра Калмана и детерминированный, основанный на фильтрах квадратного корня.

В докладе рассматривается вариант стохастического ансамблевого фильтра Калмана (ансамблевый  $\pi$ -алгоритм). В предлагаемом алгоритме ансамбль ошибок анализа получается с помощью трансформации ансамбля ошибок прогноза, шаг анализа осуществляется только для среднего значения. Все операции в этом алгоритме производятся с матрицами, размерность которых равна размерности ансамбля, кроме того, трансформации могут производиться для каждого узла сетки независимо.

Предлагается численный метод реализации ансамблевого  $\pi$ -алгоритма, приводится обоснование применимости этого алгоритма. Излагаются результаты тестовых расчетов с предложенным численным алгоритмом с целью оценки эффективности этого алгоритма (шага анализа) для трехмерной модельной области. Также приводятся результаты численных экспериментов с 1-мерной моделью Лоренца по сравнению ансамблевого  $\pi$ -алгоритма, являющегося вариантом стохастического фильтра, с ансамблевым фильтром Калмана с возмущенными наблюдениями.

### **Динамика атмосферы в условиях глобальных изменений климата**

*В. Н. Крупчатников, И. В. Боровко, Ю. В. Мартынова*

В течение последних нескольких десятилетий наблюдается изменения ключевых элементов общей циркуляции атмосферы, таких как ячейка Гадлея, высота тропопаузы, шторм треки, полярные циклоны и другие элементы общей циркуляции атмосферы. В частности, на основе анализа результатов моделирования динамики климата, с использованием идеализированной модели климатической системы, показано, что тенденция к смещению шторм треков Северного полушария в условиях

потепления климата к полюсам, будет продолжаться. Обсуждаются также другие особенности динамики климата и общей циркуляции, дается их теоретическое обоснование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-05-00480).

### **Численная модель плотностных течений в устьевых областях сибирских рек**

*А. И. Крылова, В. А. Шлычков*

В данной работе представлена численная модель для исследования динамического смешения морских и речных вод в устьевой области. В основу модели положены двумерные продольно-вертикальные уравнения механики стратифицированной жидкости и уравнение переноса соли. Модель ориентирована на воспроизведение локальных плотностных течений в устье рукавов разветвлённых дельт сибирских рек. Приводятся результаты численных экспериментов, динамическая структура потока и профиль солёности сопоставляются с данными наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта № 109 СО РАН.

Список литературы

1. Иванов В.В., Святский А.З. Численное моделирование вторжения морских вод в устье рек в сезонном временном масштабе // Водные ресурсы. 1987. №5. С.46-51.
2. Васильев О.Ф., Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. Численное моделирование стратифицированных течений в системах открытых русел и водоёмах разветвленной формы // Вычислительные технологии. 2004. Т.9. № 2, С.26-41.
3. Шлычков В.А. Численная модель для уравнений мелкой воды на криволинейной сетке с сохранением интеграла Бернулли // Журн. вычисл. матем. и мат. Физики. 2012. Т.52, №7. С.1317-1324.

### **Исследование климатической системы Северной Евразии и арктического бассейна**

*В. И. Кузин, В. Н. Крупчатников, Е. Н. Голубева, Г. А. Платов, В. В. Малахова, А. И. Крылова, И. В. Боровко, Н. А. Лаптева, А. А. Фоменко, Ю. В. Мартынова*

Работа посвящена ретроспективному анализу исследований динамики климата Северной Евразии в условиях изменения глобального климата на основе совместных моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Делается оценка обратных связей для отдельных параметров атмосферы. Исследуется роль биосферы в динамике климата XXI века, в состав которой входят приземный слой, растительный слой, почва и гидросфера. Дается оценка изменений динамики атмосферной циркуляции в условиях меняющегося климата. Исследуются особенности динамики Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана. Производится оценка влияния межгодовой изменчивости стока сибирских рек на пресноводный баланс Северного Ледовитого океана в XX и XXI веках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-05-00730).

Список литературы

1. V.I. Kuzin, E.N. Golubeva, G.A. Platov. Numerical simulation of impurity and fresh water propagation in the Arctic-North Atlantic system. // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2006. V. 21. No. 1. P.321-343.
2. Кузин В.И., Крупчатников В.Н., Фоменко А.А., Голубева Е.Н., Мартынова Ю.В., Платов Г.А. Исследование динамики климатической системы Северной Евразии и Арктического бассейна // Сиб. ЖВМ. Т.12. № 3. 2009. С. 289-295.
3. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Расчеты стока рек Сибири в XXI веке // Сборник материалов “Интерэкспо Гео-Сибирь-2015”. Новосибирск: СГУГиТ. 2015. Т. 1. С. 170-174.

### **Численное исследование турбулентных течений в нижней атмосфере**

*Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий*

В докладе представлены результаты численного моделирования турбулентных течений в планетарном пограничном слое, верхней тропосфере и нижней стратосфере на основе RANS прибли-



жения, осредненных уравнений гидродинамики. В планетарном пограничном слое (ППС) акцент сделан на развитии параметризаций турбулентных потоков импульса и тепла в устойчиво стратифицированном ночном ППС. Результаты моделирования вихревой структуры вертикального переноса согласуются с недавними данными полевых наблюдений, указывая на особенности переноса импульса и тепла. Показана возможность моделирования глобальной перемежаемости в ночном ППС. Результаты вычислительного эксперимента ставили своей целью выяснение чувствительности трехпараметрической RANS схемы турбулентности к воспроизведению перемежающейся турбулентности как вблизи подстилающей поверхности, так и 'поднятой' турбулентности, генерируемой струйным течением низкого уровня в термически устойчивом планетарном пограничном слое. Предложена численная модель острова тепла в городском ППС, которая воспроизводит структурные особенности циркуляции воздуха, хорошо согласующиеся с данными лабораторного эксперимента.

В верхней тропосфере и нижней стратосфере воздух обычно устойчиво стратифицирован и внутренние гравитационные волны, индуцируемые течением в пограничном слое, и орография оказываются доминирующими. Полученные вертикальные распределения вихревых коэффициентов диффузии импульса и тепла в диапазоне высот от 4 до 14 км хорошо согласуются с данными, полученными высокочастотным радаром.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-05-00006, 14-01-00125).

### **Оценка стока и эмиссии парниковых газов с мезоолиготрофного болота подзоны средней тайги европейского Северо-Востока России**

*Л. Э. Лапина, И. М. Успенский*

Изучается болотко Мэдла-Пэв-Нюр, которое является типичным представителем болот Европейского Северо-Востока России. С 2012 г. ведутся измерения с использованием метода eddy covariance. Измерительная система включала ультразвуковой анемометр (CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA) и инфракрасный газоанализатор открытого типа (Li-7500, Li-Cor Inc., USA). Измерения проводятся с частотой 10 Гц на высоте 3,93 м. Параметры микроклимата (температура почвы, интенсивность ФАР, падающей и отраженной солнечной радиации и др.) регистрировали автоматической метеостанцией с помощью регистратора CR3000 (Campbell Scientific Inc., США). Измерения проводились сотрудниками Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

По данным за август 2012 г. проводится оценка стока и эмиссии парниковых газов (метана, углекислого газа, водяного пара) с использованием аэродинамического метода. Так как измерения проводились только в одной точке, то предполагаем, что в горизонтальном направлении градиенты концентраций равны нулю. Также предполагается нейтральная стратификация атмосферы, при которой справедлива формула для коэффициентов диффузии, представленная в работе [1].

Для оценок стока и эмиссии парниковых газов используются уравнения тепломассопереноса.

Полученные результаты сравниваются с имеющимися измерениями вертикальных потоков.

Авторы благодарят к.б.н. О.А. Михайлова (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН) за предоставленные данные.

Список литературы

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1985, 272с.

### **Численное моделирование атмосферной циркуляции и анализ процессов распространения загрязняющих примесей от Норильского промышленного района**

*А. А. Леженин, В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева*

Промышленные выбросы в атмосферу с валовым объемом около 2 млн тонн в год являются основным источником загрязнения природной среды Норильского промышленного района. Орографические особенности рассматриваемой территории способствуют формированию горнодолинных циркуляций с большим разбросом траекторий и быстроменяющимися направлениями переноса примесей. Для описания динамики воздушного потока и перераспределения загрязнителей

применяется численная мезомасштабная модель атмосферного пограничного слоя. Приведены результаты расчетов для типичных метеорологических условий.

С использованием свойств подобия процессов распространения примеси и статистических характеристик ветрового и турбулентного режима в нижней атмосфере построены модели оценивания локального и регионального загрязнения местности. Проведена их апробация на данных экспедиционных исследований загрязнения снежного покрова тяжёлыми металлами в окрестностях Норильского медеплавильного завода. Результаты численного моделирования подтверждают достаточно высокий уровень соответствия измеренных и вычисленных концентраций. На основе представленных моделей проведён совместный анализ полей загрязнения снегового покрова и данных спутникового зондирования.

### **Оценка стабильности метангидратов в Арктике в условиях сценарного потепления климата**

*В. В. Малахова, Г. А. Платов*

Природные газовые гидраты, обнаруженные в большом количестве в донных осадках морей и океанов - потенциально опасный источник метана, который может включиться при повышении температуры или уменьшении уровня океана. Поддонные метангидраты Арктического бассейна, зона стабильности которых начинается с морских глубин 250-300 м, более подвержены тепловому воздействию. На мелководном арктическом шельфе с глубинами менее 120 м зона стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) связана с наличием подводной мерзлоты. Разрушение подводной мерзлоты и последующая дестабилизация гидратов арктического шельфа может привести к быстрому вовлечению огромных количеств метана в современный цикл углерода.

Для исследования влияния последствий изменения климата на термохалинную структуру Северного Ледовитого океана (СЛО), ледовый покров, подводную мерзлоту, ЗСГГ были проведены сценарные расчеты на основе комплекса численных моделей. Цель исследования – выявление, в какой степени изменения климата за прошедшие десятилетия могли повлиять на состояние этих природных компонент, а также определить масштабы изменчивости с учетом возможных климатических изменений до конца 21 века.

Оценка зоны стабильности гидратов проведена в зависимости от рассчитанных термобарических условий дна и донных отложений с 1948 по 2012 г. и далее до 2100 г. Термохалинное состояние придонной воды получено на основе региональной модели Северный Ледовитый океан – Северная Атлантика (СЛО-СА), разработанной в ИВМиМГ СО РАН. Возможные будущие изменения в состоянии водных масс рассчитаны с атмосферным воздействием, соответствующим сценарию потепления RCP8.5. Полученный отклик атмосферы для 2006-2100 гг. по моделям CMIP5 использовался для расчета термохалинной циркуляции в модели СЛО-СА на этот же период.

Приводятся оценки современного состояния и будущих изменений зоны стабильности субаквальных метангидратов в СЛО как в глубоководных областях, так и в недрах мелководных шельфов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-05-00730, № 15-05-02457).

### **Об одном опыте исследования многолетних рядов спутниковых наблюдений за температурой поверхности Земли на территории Западной Сибири**

*Е. А. Мамаш, П. В. Воронина, В. А. Кихтенко, В. В. Смирнов, Д. Л. Чубаров*

Измерения температуры поверхности Земли, выполненные с помощью дистанционного зондирования, отличаются высоким пространственным разрешением и регулярностью наблюдений. Эти свойства способствуют использованию этих данных для отслеживания многолетних тенденций, а также поиска аномальных значений и статистических выбросов. На этом пути исследователи сталкиваются со сложностями, которые могут быть вызваны влиянием атмосферы на результаты восстановления полей метеорологических переменных, пропусками в данных, резкими изменениями

коэффициента излучения, вызванными погодными явлениями. Частично такие помехи могут быть устранены статистическими методами. В работе представлен опыт обнаружения аномалий в многолетних рядах наблюдений температуры поверхности Земли на территории Западной Сибири, выполненных с помощью спутникового сенсора MODIS.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-07-12105-офи\_м).

### **Нахождение высоты волны цунами в лучевом приближении**

*Ан. Г. Марчук*

Найдены точные решения для конфигурации волновых фронтов и траекторий волновых лучей цунами над наклонным и параболическим рельефом дна. Полученные решения, а также формулы, описывающие изменение амплитуды распространяющейся волны цунами из-за изменения глубины и вследствие рефракции, позволяют в лучевом приближении оценить высоту волн в случае, если известна конфигурация фронта и высота волны вдоль него в какой-то момент времени. Проведено сравнение полученного таким способом распределения максимумов высот цунами от источника, имеющего круглую форму, с результатами численного расчёта такой же задачи по дифференциальной модели мелкой воды. На основе данного подхода разработан и протестирован численный алгоритм, результаты работы которого также подверглись сравнению с расчётом по модели мелкой воды. Небольшая разница в местоположении изолиний максимальных высот цунами (порядка 1 процента от размеров области) позволяет сделать вывод о применимости такого метода оценки высот в областях с несложной топографией океанического дна.

### **Использование данных спутниковых наблюдений AMV в системе усвоения на основе LETKF**

*В. Г. Мизяк, А. В. Шляева, М. А. Толстых*

Данная работа посвящена результатам использования спутниковых наблюдений ветра AMV (Atmospheric Motion Vector) в системе усвоения на основе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля (Local Ensemble Transform Kalman Filter, LETKF) [1]. Упомянутая система разработана в лаборатории перспективных численных методов Гидрометцентра России [2]. В качестве прогностической модели для получения полей первого приближения используется глобальная оперативная модель атмосферы ПЛАВ [3]. Получаемы с помощью разрабатываемой системы поля анализов будут использоваться в качестве стартовых полей для ансамблевого среднесрочного прогноза в Гидрометцентре России. В настоящее время в усвоении участвуют следующие виды наблюдений: радиозонды TEMP, наземные и корабельные наблюдения SYNOP, SHIP, самолетные наблюдения AIREP, спутниковые наблюдения SATOB, AMV.

Зачастую наблюдения AMV являются единственным источником данных о ветре в тропосфере над некоторыми акваториями океанов и в верхних широтах [4], в том числе арктических. Поэтому использование этого вида наблюдений представляется важным для улучшения качества получаемых начальных полей. В работе описываются возникающие при усвоении данных наблюдений AMV трудности и результаты работы по их преодолению.

Исследование выполнено в Гидрометцентре России за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-37-00053).

Список литературы

1. B. R. Hunt, E. J. Kostelich, and I. Szunyogh. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 230(1-2):112–126, June 2007.
2. A.V. Shlyayeva, M.A.Tolstykh, V.G.Mizyak, V.S.Rogutov. Local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the global semi-Lagrangian atmospheric model. *Russ. J. Num. An. & Math. Mod.* 2013 V 28 N 4 P 419-441.
3. М.А. Толстых, Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М, Обнинск: ОАО ФООП, 111 стр.

4. Forsythe, M., Saunders, R., 2008a. AMV errors: a new approach in NWP. Proceedings of the 9th International Wind Workshop, Annapolis, Maryland, USA, 14-18 April 2008 EUMETSAT P. 51.

### **Формирование турбулентности над неоднородно нагретыми поверхностями.**

#### **Численные решения**

*В. В. Носов, В. П. Лукин, Е. В. Носов, А. В. Торгаев*

Исследовано формирование турбулентности (турбулентные движения воздуха) в замкнутых объёмах (без обмена веществом на границах) над неоднородно нагретыми подстилающими поверхностями путём численного решения краевых задач для уравнений гидродинамики (уравнений Навье – Стокса). Показано, что над однородно нагретой поверхностью обычно наблюдаются уединённые крупные вихри (когерентные структуры, топологические солитоны), распад которых порождает когерентную турбулентность. Неоднородно нагретая поверхность приводит к появлению колмогоровской (некогерентной) турбулентности. Наши численные расчеты подтверждаются экспериментальными данными, полученными ранее в подкупольных помещениях астрономических телескопов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-05-05404).

### **Усвоение данных в моделях транспорта и трансформации атмосферной химии**

*А. В. Пененко, В. В. Пененко*

В работе представлен алгоритм усвоения данных контактных измерений концентрации атмосферной химии моделью транспорта и трансформации примесей в атмосфере. Алгоритм основан на вариационном подходе со слабыми ограничениями и схеме расщепления, что позволяет избежать итераций решения прямой и сопряженной задач переноса и трансформации примесей, т.е. алгоритм является "алгоритмом реального времени" [1]. Эффективность работы алгоритма была проверена на реальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31482, 14-01-00125) и программы Президиума РАН №18 и П.4 РАН.

Список литературы

1. А.В. Пененко, В.В. Пененко Прямой метод вариационного усвоения данных для моделей конвекции-диффузии на основе схемы расщепления // Вычислительные технологии – 2014 – №4(19) – С. 69-83.

### **Вариационные принципы в концепции природоохранного прогнозирования**

*В. В. Пененко*

В развитие идей Г. И. Марчука представлены новые результаты по созданию математических моделей и методов для решения взаимосвязанных задач экологии и климата. Их основу составляет вариационный подход в формулировках со строгими и слабыми ограничениями при наличии неопределённостей. Он позволяет рассматривать с единых позиций прямые, сопряженные и обратные задачи, а также строить методы теории чувствительности целевых функционалов прогнозирования и моделей процессов к вариациям параметров и источников воздействий. Неотъемлемую часть разрабатываемой концепции составляют методы совместного использования моделей и доступных данных наблюдений о реальных процессах. Для этих целей предлагаются прямые алгоритмы вариационного усвоения данных. Для исследования многомерных разномасштабных процессов гидротермодинамики и химии атмосферы разработаны новые дискретно-аналитические методы с применением аппарата сопряженных интегрирующих множителей. Предлагаемые вариационные методы универсальны и применимы также к моделям динамики океана, аэро-гидродинамики, эволюции живых систем и др.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы 43 Президиума РАН, Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00125) и НШ-5666.2014.5 .

### **The models of the operative hydrodynamic-statistical forecast of the storm wind over the territory of Russia**

*E. V. Perekhodtseva*

The development of successful method for automated statistical well-in-advance forecast (from 12 hours to two days) of storm winds, squalls and tornadoes is actual problem because the prediction of these phenomena is a very difficult problem for synoptic till recently. The synoptic gives the storm warning of this dangerous phenomenon with the earliness only 3 hours.

Nowadays in Russia there is no successful hydrodynamic model for the forecast of such storm wind (with the velocity  $V > 19$  m/s,  $V > 24$  m/s), hence the main tools for the objective forecast development are the methods using the statistical model of these phenomena recognition. The using of the values of the prognostic fields of some hydrodynamic Russian hemispheric [1] and regional [2] models in the statistic discriminant functions allowed us to develop the models of the hydrodynamic-statistical forecast of the storm winds. These forecasts were recommended for the using in the operative practice [2].

#### References

1. Perekhodtseva E.V. Hydrodynamic- statistical model of the forecast to 36 hours ahead of dangerous convective daytime and nighttime phenomena – squalls, tornadoes and rainfalls.// Research activities in atmospheric and oceanic modeling, Report 32, 2003.

2. Perekhodtseva E.V. Hydrodynamic- statistical forecast method of the squalls and of the strong wind in the class of dangerous phenomena on the summer to 12-36h ahead using the prognostic fields of the regional model for the European territory of Russia//Russian. Moscow: 2013. The proceedings of the information, N 40, p. 170-181.

### **The models of the operative hydrodynamic-statistical forecast of the heavy rainfalls causing often floods, landslides, mudflows**

*E. V. Perekhodtseva*

The statistical forecast models of heavy and dangerous rainfalls and precipitation causing often floods, landslides, mudflows are submitted at this talk. These models are based on the recognition of the meteosituation sets with the presence of the high values of precipitation and the absence of such values. The automated hydrodynamic-statistical forecast models were developed on the base of these statistical models with the using output production of the hydrodynamic forecast models (the hemispheric model and the regional model [1]). The forecast methods of the precipitation  $Q > 14$  mm/12 h were recommended for the using at the operative practice after independent tests [1]. The estimation are successful in the comparison with the estimation of the hydrodynamic forecasts [1, 2]. At this report are given the examples of the prediction of heavy rainfalls for the territories of North Caucasus, European part of Russia, Siberia and other. These forecasts allow to mitigate the great economic losses (the flood on the small river Nechepsukho at the North Caucasus brings economic losses equal 3 mln. Rubles).

#### References

1. E.V. Perekhodtseva. Hydrodynamic-statistical method of the forecast of the heavy summer precipitation over European territory of Russia on the base output data of the regional model of Hydrometcenter of Russia // Russian. Informazionnyi sbornik. Moscow: 2014, N41, p. 74-87.

2. A.N. Bagrov. Comparative estimation of the heavy summer precipitation forecasts of the hydrodynamic models of the different scale / Russian. Informazionnyi sbornik. Moscow: 2014, N41, p.63-73.

### **Численное моделирование распространения выбросов от лесного пожара в районе Читы**

*Э. А. Пьянова, Д. В. Перевозкин, Л. М. Фалейчик*

Леса в Забайкальском крае горят с разной степенью интенсивности ежегодно – с марта по октябрь. Особой напряженностью отличаются весенние месяцы. Природно-климатические особенности территории – малоснежные зимы, сильные ветры весной, полное отсутствие или очень малое количество осадков в весенний период – способствуют возникновению и быстрому распространению огня. Причина подавляющего большинства возгораний – человеческий фактор, поэтому часто очаги пожаров локализируются вблизи населенных пунктов, вследствие чего их воздушные бассейны



почти круглосуточно переполнены продуктами горения окрестных лесов. Большую нагрузку испытывают населенные пункты, расположенные в плохо проветриваемых котловинах, например, город Чита, расположенный в Читино-Ингодинской впадине: в период лесных пожаров котловина на длительное время заполняется дымом.

В работе представлены результаты предварительных оценочных сценарных расчетов по изучению процессов переноса пассивной примеси в Читино-Ингодинской впадине, имитирующие в первом приближении процессы загрязнения атмосферы выбросами лесных пожаров. При моделировании изучались и характерные метеорологические ситуации, способствующие накоплению и застою дыма в долинах. Моделирование проведено на основе мезомасштабной модели динамики атмосферы и переноса примеси в областях со сложным рельефом.

Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований № 43 Президиума РАН, Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00125-а), проекта IX.88.1.6 Фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН.

### **Численные сценарные оценки влияния объектов ГПК на качество атмосферы юго-восточного Забайкалья**

*Э. А. Пьянова, Л. М. Фалейчик*

Практически вся территория юго-восточного Забайкалья вовлечена в развитие горнопромышленного комплекса. Перспективным в этом отношении является Быстринское золото-медное месторождение. Разработка этого узла включает добычу руды открытым способом и переработку ее на горно-обогатительной фабрике. Способ разработки предполагает взрывы в карьерах с массовым выбросом в атмосферу пыли, оксида углерода и других соединений, причем на значительную высоту. Другим источником выбросов загрязнений в атмосферу при эксплуатации Быстринского ГОКа в зимний период будет котельная. Зимой Забайкалье находится под влиянием Сибирского антициклона, способствующим формированию устойчивой стратификации атмосферы, с частыми инверсиями. Такие метеорологические условия затрудняют рассеивание примесей, что можно считать благоприятным фактором, уменьшающим вынос пыли за пределы карьеров при взрывах. С другой стороны, эти же условия могут способствовать накоплению вредных примесей на технологических площадках вблизи котельной. Другим важным моментом является оценка дальности и характерных направлений переноса примесей за пределами территории ГОКа, поскольку к югу и северу от него располагаются особо охраняемые природные территории: Борзинский, Туровский и Урюмканский заказники.

В работе на основе сценарного численного моделирования проведены исследования особенностей распространения пассивной примеси от мгновенных и постоянно действующих источников выбросов, расположенных на территории проектируемого ГОКа.

Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований № 43 Президиума РАН, Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00125-а), проекта IX.88.1.6 Фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН.

### **Оценка влияния стратификации атмосферы на перенос примеси в воздушном бассейне Байкальского региона**

*Э. А. Пьянова, Л. М. Фалейчик*

Представляются некоторые результаты численного исследования влияния температурной стратификации атмосферы на перенос пассивной примеси в орографически сложной области Байкальского региона. Источники выбросов примеси в экспериментах задавались в местах расположения крупных предприятий Иркутско-Черемховского промышленного комплекса. При проведении сценарного моделирования выявлялись неблагоприятные метеорологические ситуации, способствующие дальнему переносу примеси к акватории Байкала. Расчеты проведены для ряда типичных зимних и летних метеорологических сценариев, характерных для исследуемой территории. Рассмотрены случаи задания нейтральной и устойчивой стратификации в нижних слоях атмосферы

в летний период. Для зимних сценариев рассматривались различные случаи устойчивого состояния атмосферы, включая инверсионное распределение температуры по высоте.

Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований № 43 Президиума РАН, Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00125-а), проекта IX.88.1.6 Фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН.

### **Планирование и анализ наблюдений в обратных задачах переноса примеси от совокупности источников**

*В. Ф. Ранута, Т. В. Ярославцева*

В докладе обсуждаются проблемы реконструкции полей концентраций от совокупности достаточно удалённых друг от друга аэрозольных источников, допускающих существенное взаимное наложение полей выпадений. В этом случае при проведении натурных исследований необходимо более тщательное планирование размещения точек отбора проб с учётом геометрических и динамических параметров источников, априорных сведений о характеристиках дисперсного состава, текущих гидрометеорологических и климатических условий и т.д. В теоретическом плане происходит значительное увеличение в моделях реконструкции количества оцениваемых параметров. Это приводит к необходимости разработки алгоритмов решения возникающих оптимизационных задач, привлечения методов теории планирования экспериментов, дополнительного учёта априорных сведений о размещении и характеристиках источников примеси.

Разработана модель реконструкции поля выпадений аэрозольной примеси от совокупности источников. На её основе предложены алгоритмы построения статических и локально оптимальных планов наблюдений. Проведена апробация модели на данных натурных исследований пылевого загрязнения снежного покрова в окрестностях ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 г. Новосибирска. Представлены оценки суммарных выпадений пыли от рассматриваемых источников на территории города в зимнем сезоне 2013/14 г.

### **Информационно-аналитическая система "Эко Прогноз"**

*С. Ж. Рахметуллина, А. А. Бубликов, А. В. Пененко, Е. М. Турганбаев*

В работе представлены результаты разработки информационно-аналитической системы экологического мониторинга "Эко Прогноз" [1-2]. Математическое обеспечение информационно-аналитической системы базируется на алгоритмах решения прямой задачи конвекции-диффузии, вариационных алгоритмах локализации источников загрязнения и усвоения данных мониторинга [3-5]. В работе приведены результаты исследования чувствительности алгоритма усвоения данных для модели конвекции-диффузии к ошибкам входных параметров, таких как данные наблюдений, метеорологические параметры. Также в работе приведены результаты исследования алгоритма усвоения данных для модели конвекции-диффузии при добавлении входного параметра – информации об источниках загрязнения.

Работа проводилась в рамках государственного заказа по бюджетной программе 120 "Грантовое финансирование Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан".

#### Список литературы

1. А.В. Пененко, А.А. Бубликов, С.Ж. Рахметуллина. Integrated information system for ecological monitoring of atmospheric air of an industrial, Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики - 2014", Академгородок, Новосибирск, Россия, 8-11 июня 2014.

2. С.А. Бельгинова, С.Ж. Рахметуллина. Computer Modeling Of Air Pollution Using The Model Data Assimilation // International Scientific and Practical Conference "Green economy is the future of humanity", EKSTU, Ust-Kamenogorsk, May, 2014.

3. V.V. Penenko. Variational data assimilation methods and inverse problems to study atmosphere, ocean and environment // Sib. Zhur. Comp. Math. 12(4):341–351, 2009.

4. A.V. Penenko and V.V. Penenko. Direct data assimilation method for convection-diffusion models based on splitting scheme // Computational technologies, 19(4):69–83, 2014.

5. S. Belginova, S. Rakhmetullina. Modeling Of Air Pollution Using The Model Data Assimilation // International Scientific and Practical Conference "Green economy is the future of humanity", Ust-Kamenogorsk: 39-53, 2014.

### **Численный прогноз погоды и влияние исследований Гурия Ивановича Марчука на его развитие**

*Г. С. Ривин*

Современные оперативные модели атмосферы на самом деле уже являются моделью окружающей среды, так как они обязательно включают в себя описание процессов в деятельном слое суши и озерах (а не только в атмосфере), химический блок и модель прогноза волн в океане.

В докладе предполагается дать обзор современных систем прогноза погоды (модель окружающей среды плюс технологическая линия) и показать, какие исследования Гурия Ивановича Марчука (даже работы, выполненные во время обучения в аспирантуре!) оказали и продолжают оказывать важнейшее влияние на развитие этих систем. Например, работа, выполненная им совместно с Н.И. Булеевым, метод расщепления и полуявный метод Марчука – Робера для решения метеорологических проблем, вклад в развитие систем усвоения данных (более подробно по-видимому на этом остановится В.В.Пененко), создание Сибирской школы для исследования процессов в атмосфере и океана.

Докладчику посчастливилось работать в Вычислительном центре СО АН СССР под непосредственным руководством Гурия Ивановича в 1962-1980 гг., поэтому содержание доклада будет основано частично и на личных воспоминаниях о работах Гурия Ивановича этого периода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-37-00053) в Гидрометцентре России.

### **Оперативная негидростатическая система краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru**

*Г. С. Ривин, И. А. Розинкина, Д. В. Блинов, М. В. Шатунова*

Еще совсем недавно разработать модель атмосферы было под силу одному человеку или небольшому коллективу исследователей. Сейчас такая работа под силу только большим коллективам зачастую из разных стран. Характерным примером работы метеорологических сообществ является консорциум COSMO (Росгидромет вступил в этот консорциум в 2009 г.), а характерным примером совместной разработки, усовершенствования и использования многомасштабной многоцелевой модели является его негидростатическая модель COSMO.

В докладе будет описана современное состояние оперативной системы COSMO-Ru (прогнозы для различных территорий с шагами сетки 13.2, 7, 2.2 и 1.1 км), работы по развитию и совершенствованию модели COSMO, применение для метеорологического обеспечения летней Универсиады Казань-2013 и зимней Олимпиады Сочи-2014.

Исследование частично выполнено за счет финансовой поддержки Российского научного фонда (проект №14-37-00053) в Гидрометцентре России.

Список литературы

1. Ривин Г.С., Розинкина И. А., Вильфанд Р. М., Алферов Д. Ю., Астахова Е. Д., Блинов Д. В., Бундель А. Ю., Казакова Е. В., Кирсанов А. А., Никитин М. А., Перов В. Л., Суркова Г. В., Ревокатова А. П., Шатунова М. В., Чумаков М. М. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития. Метеорология и гидрология, 2015, № 6. С. 58-67.

### **Численное моделирование атмосферных процессов над городом в условиях слабого ветра**

*А. В. Старченко, А. А. Барт, Л. И. Кижнер, М. В. Терентьева*

Представлены результаты исследования метеорологической ситуации и уровня загрязнения воздуха в Томске на основе вычислительного комплекса, включающего мезомасштабную негидроста-

тическую метеорологическую модель TSU-NM3 [1], а также фотохимическую модель [2], в которой на основе рассчитанных метеорологических полей оценивается распространение примесей от источников, расположенных в черте города. Для оценки точности метеорологической модели используются данные ТОР-станции ИОА СО РАН (восточная окраина города), метеостанции WXT520 и температурного профилемера МТР-5 ИМКЭС СО РАН. Оценка результатов расчета по фотохимической модели выполнена с использованием данных постов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в Томске и данных наблюдений на ТОР-станции и на базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН.

Работа выполнена по Государственному заданию Министерства образования и науки РФ (код проекта 5.628.2014/К).

Список литературы

1. Starchenko A.V., Bart A.A., Bogoslovskiy N.N., Danilkin E.A., Terenteva M.A. Mathematical modelling of atmospheric processes above an industrial centre // Proceedings of SPIE, 2014, Vol. 9292, 929249-1.
2. Барт А.А., Старченко А.В., Фазлиев А.З. Информационно-вычислительная система для краткосрочного прогноза качества воздуха над территорией г. Томска // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 07. С. 594–601.

### **Особенности моделирования радиационного форсинга на климат и экосистемы в условиях Арктики**

*Т. А. Сушкевич, С. А. Стрелков, С. В. Максакова, Л. Д. Краснокутская*

Работа посвящается "Международному году света и световых технологий". "Свет – это символ единения, символ мудрости", – подчеркнул глава ООН на церемонии открытия в Юнеско.

В повестке дня современной цивилизации ведущее место занимает освоение и покорение региона Арктики. Этот фундаментальный международный проект почти такого же масштаба, как проект освоения и покорения космоса, и для его реализации чрезвычайно важно использовать приобретенный опыт и в теории, и в практике при создании комплексных систем ПРО и ПВО, включая системы оперативного наблюдения и глобального мониторинга, принятия решения и управления с использованием суперкомпьютеров, информационных технологий и технологий Интернет, ГРИД, "облачных", ГЛОНАСС и т. п. Немало аналогий: объект исследования виден, но труднодоступен, комплексный, междисциплинарный, фундаментальный, международный и цивилизационный, до сих пор пока только удел энтузиастов и увлеченных, осталось ещё много загадок и уже остро стоят несколько ключевых для планеты Земля вопросов, хотя история изучения Арктики насчитывает сотни лет. Почему изменяются океанические течения? Почему тает лед? Какова угроза "всемирного" потопы и "ледникового периода"? Как могут измениться климат и биосфера за полярным кругом под влиянием естественно-природного и антропогенно-техногенного воздействия на окружающую среду? Какие угрозы связаны с увлечением добычей углеводородов на шельфе океана и последствиями расширения сферы нефтегазовой отрасли? Как обеспечить круглогодичный Северный морской путь для судов?

Опыт покорения космоса [1, 2], безусловно, полезен для освоения региона Арктики – много общего: на каждом шагу подстерегает опасность, непредсказуемые перспективы последствий антропогенного вмешательства и каждый шаг "освоения" и "покорения" требуется тщательно анализировать, прогнозировать и просчитывать, привлекая интеллект не только нации, но и всего мирового научного сообщества, – важно "не навредить" человеку и планете в целом!

Следует признать, что первыми "вычислителями"-практиками в теории переноса были Е.С. Кузнецов в СССР (с 1925 года!) [3] и С. Чандрасекар в США [4]. В условиях региона Арктики с учетом условий освещения солнечным потоком для моделирования радиационного форсинга на климат и экосистемы необходимо использовать многомерные сферические модели переноса излучения, позволяющие рассчитывать глобальные радиационные поля [5, 6]. Полезный опыт был приобретен в исследованиях и фотосъемке Антарктиды с космического аппарата "Космос-2000", а также по Международной программе "Мировой океан", по Международной озоновой программе (со-

вместный советско-американский озоновый спутник с полярными солнечно-синхронными орбитами), совместно с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом.

Исследование проведено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00783, 14-01-00197).

Список литературы

1. Сушкевич Т.А. О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса. 1999, № 6. С.49-66.
2. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. 60 лет от первого совещания по ИСЗ до современных систем дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса: информационно-математический аспект (история и перспективы) // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27, № 7. С.573-580.
3. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды / Отв. ред. и составитель Т.А. Сушкевич. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
4. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / Пер. с англ. издания Oxford, 1950, под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.
5. Сушкевич Т.А. Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Тр. ИПМ АН СССР. О-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
6. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.

### **Анализ различных схем параметризации тепло- и влагообмена в подстиляющей поверхности для мезомасштабной модели атмосферного пограничного слоя**

*М. В. Терентьева, А. В. Старченко*

Для достоверного моделирования состояния атмосферы важную роль играют процессы, протекающие на подстиляющей поверхности и в деятельном слое суши. Деятельный слой почвы играет ключевую роль как резервуар влаги, контролирующей, в частности, испарение.

В работе рассмотрены два подхода к моделированию тепло- и влагообмена в подстиляющей поверхности. Первый подход основан на решении одномерного уравнения теплопроводности почвы от поверхности Земли, на которой известно значение теплового потока, до некоторой фиксированной глубины, температура которой полагается известной и не меняющейся во времени в течение периода моделирования. Предполагается, что влажность воздуха вблизи поверхности Земли не может быть больше влажности насыщения вблизи поверхности и меньше влажности воздуха на высоте первого расчетного узла. Во втором подходе используется схема параметризации ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere), разработанная Noilhan и Planton [1]. Схема включает в себя обработку теплосодержания почвы, содержание влаги в почве, воду перехваченную растительностью и аэродинамические процессы переноса в приземном слое атмосферы.

Проведен анализ расчетов моделирования по трехмерной мезомасштабной модели TSU-NM3 [2] с использованием подходов, описанных выше.

Работа выполнена по Государственному заданию Министерства образования и науки РФ, №5.628.2014/К.

Список литературы

1. J. Noilhan, The ISBA land surface parameterisation scheme/ J.-F. Mahfouf // Global and Planetary Change, 13 (1996), pp. 145-159.
2. А. В. Старченко, Численное исследование локальных атмосферных процессов // Вычислительные технологии. – 2005, №10. С. 81-89.

### **Обновление глубинных вод Байкала как следствие диссоциации метангидратов (по результатам численного моделирования)**

*Е. А. Цветова*

Рассматривается задача о моделировании гидротермодинамики гетерогенной системы, в состав которой входит вода и метан (растворенный, газ и гидрат). С течением времени система трансфор-



мируется с учетом фазовых переходов. Все фазы моделируются как сплошные среды. Основная фаза – жидкость, которая рассматривается как несущая среда.

Для моделирования гидротермодинамики воды в озере используется математическая модель в негидростатическом приближении. Она представлена системой уравнений в частных производных для трех компонентов вектора скорости, уравнения для температуры, уравнения состояния и уравнения неразрывности.

Поведение фаз метана описывается системой уравнений типа конвекции – диффузии – реакции. Предполагается, что растворенный метан движется со скоростью несущей среды, а газовая и твердая фазы получают дополнительные скорости подъема за счет сил плавучести. Термические эффекты, учитывающие скрытую теплоту перехода фаз, включены в уравнение для температуры. Система уравнений дополняется соответствующим набором краевых и начальных условий.

По результатам сценарных расчетов сделан вывод о возможности запуска процессов обновления глубинных вод озера вследствие диссоциации метангидратов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00125).

### **Модель воздействия гравитационных сил Луны и Солнца на оболочки Земли**

*Д. Л. Чубаров, В. А. Кочнев*

Традиционно не принято рассматривать влияние гравитационных сил Луны и Солнца на процессы, происходящие в литосфере и ядре Земли. Исключением являются работы [1, 2].

В работе [3] высказано обоснованное предложение, что магнитное поле Земли формируется потоком слабо положительно заряженной оболочки внешнего ядра. Движение ее обосновано влиянием гравитационных сил Луны и Солнца, процессом вращения Земли. В данном докладе будут представлены результаты моделирования воздействия приливных сил Луны и Солнца на сейсмологическую активность Земли.

Список литературы

1. Авсюк Ю. Н. Связь приливной эволюции системы Земля – Луна с проблемами геодинамики // Вестник Российской Академии Наук. 1996. Т.66 №2. с.129 – 134.
2. Кочнев В. А. Кинематико-гравитационная модель геодинамо// Геофизический журнал № 4, т. 35, 2013 г. – с. 3 – 15;
3. Кочнев В. А., Адамцева О. А. Довыденко О. С., Некоторые результаты моделирования магнитного поля Земли// Труды IV Научных чтений им. Ю. П. Булашевича. – Екатеринбург. – 2007. – С. 160 – 163

### **Математическое моделирование турбулентного течения в русле реки**

*В. В. Чуруксаева, А. В. Старченко*

В работе представлены результаты моделирования турбулентных речных потоков. На основе осредненных по глубине уравнений Рейнольдса строится модель турбулентного течения в русле реки с учетом рельефа дна. Трение об дно учитывается добавлением источниковых членов в уравнения для компонент скорости. Обосновывается выбор модели турбулентности для нахождения турбулентных характеристик.

Обсуждаются также вопросы аппроксимации исходных дифференциальных уравнений с помощью схем 2-3 порядка точности и различные варианты выбора функций стенки.

Предлагается итерационный алгоритм совместного решения уравнений для глубины, компонент скорости и концентрации примеси позволяющий получать качественные результаты как для основных тестовых случаев течения в открытых каналах (канал с поворотом, обтекание препятствий, расчет боковых выбросов), так и в случае расчета крупномасштабного течения в русле реки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 5.628.2014/К.

## **Dynamics of mesoscale gravity flows in the atmosphere**

*M. S. Yudin*

A two-dimensional finite-element model and a three-dimensional finite-difference model in the Boussinesq approximation are used to study the retardation of cold atmospheric fronts by mesoscale obstacles of various shapes and slopes [1, 2]. The model input data are specified with an analytical model for an idealized front. The finite-difference model is used for relatively smooth terrain, while the finite-element model is developed for steep slopes. Both models are based on the compressible Navier-Stokes equations with a special procedure of filtering the spurious noises. Various types of stratification are used in the simulations.

The model results are compared with analytical solutions to a shallow water equation model and results of finite-difference simulations in three dimensions [3] and in two-dimensional cases [4]. At neutral stratification the speed of front propagation calculated by the two-dimensional model agrees with an empirical formula and simulation results reported in [4]. The results of two dimensional finite-element simulations show the formation of hydraulic jumps on the front surface, which is in agreement with existing theories and the results of finite-difference simulations obtained in [4].

This study was supported by the Presidium of RAS, under Program 43, and the Russian Foundation for Basic Research, under 14-01-00125-a.

### References

1. Yudin, M.S. and Wilderotter, K. Simulating atmospheric flows in the vicinity of a water basin // Computational Technologies, 11, 128-134 (2006).
2. Yudin, M.S. Comparison of FDM and FEM models for a 2D gravity current in the atmosphere over a valley // Bull. Novos. Comput. Center, 13, 95-101(2012).
3. Schumann, U. Influence of mesoscale orography on idealized cold fronts // J. Atmos. Sci., 44, 3423-3441 (1987).
4. Bischoff-Gauss, I., Gross, G. and Wippermann, F. Numerical studies on cold fronts. Part 2: Orographic effects on gravity flows // Meteorol. Atmos. Phys., 40, 159-169 (1989).

## **Modelling wind-induced summer circulation and thermal structure of lake Shira**

*T. V. Yakubailik, L. A. Kompaniets*

Our report focuses on 3-d numerical modeling of flow structure in Lake Shira in summer. A salt stratified Lake Shira is the subject of extensive research because of its central role in the Khakassia resort area. This lake has the north-south length of 5 km, east-west width of 9 km, and its maximum depth is 25 m now (it can varies from year to year). The flow velocity, temperature and salinity distribution and fluctuations of the thermocline (density) were measured in Shira in summers 2009-2014 using current doppler profilers and CTD probes. Stable inhomogeneity of temperature and salinity with depth determines density stratification in the lake.

Three-dimensional primitive equation numerical model GETM [1] is applied to simulate hydrophysical processes in Lake Shira. The model is hydrostatic and Boussinesq. The measured temperature and salinity distribution are the initial data for computations. An algorithm of high order approximation is opted for calculating the equations of heat and salt transfer. Different turbulence closures are used in computations.

For a given wind scenario the spatial and temporal variability of the major hydrophysical characteristics have been computed. We have analyzed 3-d phenomenon in this stratified lake taking into account native meteorological conditions.

The project has been partially supported by RFBR grant №13-05-00853.

### References

1. [Electron. resources]. <http://getm.eu>.

**Методы наземного и спутникового мониторинга загрязнения снежного покрова**

*Т. В. Ярославцева, В. Ф. Ранута*

На космических снимках проявляется осаждение на снежный покров аэрозолей промышленного происхождения. Почернение изображения на них непосредственно зависит от степени запыления и отражает атмосферную динамику процессов переноса примеси от источника, что создаёт возможности взаимной количественной интерпретации.

Рассмотрены задачи восстановления полей загрязнения снежного покрова от пылящих точечных, линейных и площадных источников по данным наземных и спутниковых наблюдений. С использованием моделей реконструкции разработаны методы совместного анализа характерных изображений ореолов загрязнения снежного покрова в окрестностях источников пыли и данных контактных наблюдений. На основе численного анализа данных наземного мониторинга и спутниковыми снимками выявлены устойчивые количественные закономерности между полями выпадения пыли и интенсивностью изменения тонов серого цвета по радиальным относительно основных источников направлениям.

Результаты проведённых исследований позволяют существенно оптимизировать выполнение наземного мониторинга загрязнения окрестностей промышленных предприятий в зимний период времени. С использованием данных спутниковых наблюдений и сравнительно небольшого количества точек отбора проб снега показана возможность восстановления полей многокомпонентного загрязнения территорий и оценивания суммарного выброса примесей.

## Секция 6. ПРОГРАММИРОВАНИЕ

### **Intel® Math Kernel Library PARDISO for Intel® Xeon Phi™ manycore coprocessor**

*А. В. Андерс, А. А. Калинин, Р. В. Андерс*

The paper describes an efficient implementation of direct method for solving the equation  $Ax = b$  with a sparse matrix  $A$  on the Intel® Xeon Phi™. The main problem for such kind of system is how to engage all available threads (about 240) and how to reduce OpenMP synchronization which is very expensive here. The method consist in decomposition of the matrix  $A$  into a product of a lower-triangular, diagonal, and upper triangular matrices followed by solving resulted 3 subsystems computed. The main idea based on hybrid parallel algorithm used in Intel® Math Kernel Library Parallel Direct Sparse Solver for Clusters. Our implementation exploit static scheduling algorithm on factorization step to reduce OpenMP synchronization. To effectively engage all available threads a 3-level approach of parallelization is used. Furthermore, we demonstrate that our implementation allows to achieve scalability up to 100 times on factorization and up to 65 times of overall performance on 240 threads on KNC.

### **Модельно-ориентированное проектирование как основа повышения качества встроенного программного обеспечения**

*С. Б. Арыков*

В последние годы в российской космонавтике произошло достаточно много аварий, некоторые из них напрямую связаны с ошибками во встроенном программном обеспечении, которые не были обнаружены в многочисленных наземных испытаниях. Одна из возможных причин – недостаточно высокий уровень контроля качества ПО, применяемый на большинстве отечественных предприятий, когда тестовые сценарии по-прежнему выбираются экспертным путём на основе "ощущений" программистов. Новые подходы к тестированию, позволяющие автоматизировать процесс генерации тестов, достаточно давно разработаны, но их применение на практике сталкивается с рядом трудностей.

В работе рассматривается применение модельно-ориентированного проектирования [1, 2], гарантирующего качество получаемого программного продукта с помощью автоматической генерации тестового покрытия кода с заданными метриками. На примере разработки и тестирования автомата управления бортовой радиоэлектронной аппаратурой космического аппарата демонстрируются его преимущества и недостатки.

Список литературы

1. Антипин А. М., Арыков С. Б., Отрадных А.В. Применение методики модельно-ориентированного проектирования при разработке сложных радиоэлектронных систем // V юбилейная общероссийская научно-техническая конференция "Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем". – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – Стр. 11-19.

2. Доронин В.В. Основы технологии ускоренного проектирования сложных образцов вооружения и военной техники // Вестник Концерна ПВО "Алмаз-Антей". – 2012. – №2 (8). – Стр. 3-15.

### **Метод BDD для сложных поисковых систем**

*С. Аубакиров, А. Т. Бектемесов*

На сегодняшний день компьютеры и всемирная сетевая коммуникация стали социальным требованием, мера электронной информации растет все больше и больше. Следовательно, одним из основных проблем в управлении больших данных является система поиска, которые обеспечивают быструю обработку запросов.

Инвертированные файлы обеспечивают быстрого поиска, если, конечно, не экспоненциальный рост числа состояний. При росте информации, существенно увеличиваются документы, а также размер инвертированных файлов.

Мы предлагаем модифицированного метода сжатия BDD как Multi Bitmap Decision (MBD). Метод MBD способствует для использования в онтологических связях. Еще одно преимущество в использовании MBD является, то что BDD выражения могут эффективно обрабатывать логические запросы, которые очень распространены в поисковых системах.

В рисунке 1а условия индексирования сортируются в алфавитном порядке. Для каждого термина поддерживается структура данных, который представляет собой список указателей, указывающих на документы, содержащих термин, а позиции терминов находится в этих документах. Следовательно, можно также использовать bitmap как структуры данных, как показано в рисунке 1б. Каждый объект в индексе соответствуют битового масштаба. Длина каждого битового вектора равна суммарной численности документов, и каждый документ, соответствует позиции в векторе битов.

а				б			
Words	id = n (e.g. exist in documents)	id = k (e.g. connections with other words)	.....	Words	id = n (e.g. exist in documents)	id = k (e.g. connections with other words)	.....
Scalable	0 2 3 4 6 8 9 10 12 13 16	0 1 7 11 12 15	.....	Scalable	1 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 0 1	1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 1	.....
Scalene	0 3 4 8 9 10 11 12 13 14	0 2 4 5 9 10 11 13 14	.....	Scalene	1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0	1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 1 0	.....
Scheme	4 8 9 11 12	0 3 4 8 9 10 11 12 13 14	.....	Scheme	0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0	1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0	.....
School	0 1 2 3 4 8 9 10 13 14 15	3 4 7 8 12 14		School	1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0 1 1 1	0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0	.....

Рис. 1. Пример построение слов для обработки в MBD

Работа выполнена при поддержке Комитета Науки МОН РК, грант № ГФ4 "Разработка интеллектуальной высокопроизводительной информационно-аналитической поисковой системы обработки слабоструктурированных данных".

Список литературы

1. Карпов Ю.Г. Model Checking верификация параллельных и распределенных систем. 331–333, 2010.
2. Narayan. A. Recent advances in BDD based representations for Boolean functions // A survey. In Proc. 12th Intl. Conf. on VLSI Design, 408–413, 1999.

## Нечеткие кластеры с объемными прототипами в автоматической классификации спутниковых данных

А. А. Бучнев, В. П. Пяткин

В работе рассматриваются вопросы, связанные с использованием нечеткой кластеризации расширенными алгоритмами *C*-средних (*Fuzzy C-means – FCM*) и Густафсона – Кесселя (*Gustafson – Kessel – GK*) в автоматической классификации (кластеризации) спутниковых данных [1]. В алгоритме *FCM* выбранная метрика одинакова для всех кластеров и не меняется в процессе работы. Принципиальное отличие алгоритма *GK* от алгоритма *FCM* состоит в том, что каждый кластер имеет индивидуальную метрику, основанную на нечеткой ковариационной матрице кластера. Эта метрика динамически меняется в процессе выполнения итераций алгоритма.

Расширение *FCM* и *GK* алгоритмов (получаются *E-FCM* и *E-GK* алгоритмы) состоит в следующем:

1. В качестве прототипов кластеров используются объемные прототипы (*volume prototypes*). В частности, в алгоритме *E-FCM* используется евклидова метрика, тогда таким прототипом будет гипершар. В алгоритме *E-GK* объемным прототипом кластера является гиперэллипсоид. Размеры объемных прототипов определяются на основе объемов кластеров. Такие прототипы менее чувствительны к отклонениям в распределении данных.

2. Вводится понятие "сходства" (*similarity*) кластеров. Начиная с заведомо большего числа кластеров, кластеры, степень сходства которых превышает заданный порог, объединяются в процессе кластеризации для того, чтобы получить подходящее разбиение данных.

Включение алгоритмов *E-FCM* и *E-GK* в состав программного комплекса по обработке спутниковых данных PlanetaMonitoring позволяет расширить возможности системы кластеризации



комплекса по построению разбиения, наиболее полно соответствующего внутренней структуре данных.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-07-00068).

Список литературы

1. Uzay Kaimak and Magne Setnes. Extended Fuzzy Clustering Algorithms. ERIM report series ERS-2000-51-LIS. Rotterdam, Netherlands, November 2000, 24 pp.

### **Разработка интерактивных приложений для HPC Community Cloud**

*М. А. Городничев, С. А. Вайцель*

Представлен программный интерфейс (API) и методика для разработки и встраивания интерактивных приложений HPC Community Cloud (HPC2C) [1], а также примеры приложений. HPC2C — это программный инструментарий для обеспечения доступа программных систем через API и пользователей через веб-интерфейс к высокопроизводительным вычислительным системам (ВВС), накопления и повторного использования программ для решения прикладных задач на ВВС, повышения уровня интерфейсов взаимодействия пользователей с ВВС. Разработанные средства для встраивания приложений позволяют создать веб-интерфейс для управления вычислительным приложением, которое может выполняться на ВВС в пакетном или интерактивном режимах. Приложение регистрируется в списке приложений HPC2C, и разработчик может настроить уровень доступа к этому приложению для различных классов пользователей HPC2C.

Список литературы

1. Городничев М. А., Вайцель С. А. Организация доступа к высокопроизводительным вычислительным ресурсам в HPC Community Cloud // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2014. № 4. С.85-95.

### **Использование DVMH для решения задач геофизики на гибридных кластерах (CPU, GPU, Phi)**

*К. В. Калгин, С. Е. Киреев*

Параллельный программный комплекс для моделирования процесса фильтрации двухфазной жидкости через эластичную пористую среду [1] был реализован с использованием DVM-системы на языке Fortran DVMH [2]. DVM-система позволила адаптировать исходный последовательный код для запуска на гибридных кластерах с использованием ускорителей GPU и Xeon Phi. Приведены оценки эффективности распараллеливания.

Список литературы

1. Perepechko Yu.V., Romenski E.I., Reshetova G.V. Modeling of multiphase flows in finite-deformed porous media // E. Onate, et al. (eds), Proc. of 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), Spain. 2014. P. 4630-4641.

2. В.Ф. Алексахин, В.А. Бахтин, О.Ф. Жукова, А.С. Колганов, В.А. Крюков, Н.В. Поддерюгина, М.Н. Притула, О.А. Савицкая, А.В. Шуберт. Распараллеливание на графические процессоры тестов NAS NPВ3.3.1 на языке Fortran DVMH // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2014): труды международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 1–3 апреля 2014 г.), Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014, С. 30-41.

### **Сравнительный анализ и параллельная реализация для GPU двух подходов полулагранжевого метода для задачи адвекции**

*Е. Д. Кареева, А. В. Вяткин, А. А. Ефремов*

Полулагранжевый подход к построению дискретных аналогов обладает несомненным достоинством для гиперболических задач – безусловной устойчивостью. Один из вариантов этого подхода, предложенный и обоснованный в [1], строится для равномерных сеток (необязательно одинаковых

на разных слоях по времени), учитывает граничные условия и сохраняет балансовые соотношения при переходе с одного временного слоя на другой.

Алгоритм обладает высоким потенциальным параллелизмом. Наиболее вычислительно- и ресурсоёмкой частью кода является алгоритм интегрирования по четырехугольнику, в общем случае произвольно ориентированному относительно сетки предыдущего временного слоя [1]. В настоящей работе дан подробный анализ особенностей архитектуры GPU, не позволяющих достигать эффективного распараллеливания алгоритма с помощью технологии CUDA. На основе идеи, изложенной в [2], построен и распараллелен новый алгоритм интегрирования, который дает ускорение более чем в 40 раз. Также для этого алгоритма приведено сравнение эффективности распараллеливания с помощью технологий CUDA и OpenMP.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00296-а, 14-01-31203).

Список литературы

1. Efremov A., Karepova E., Shaydurov V., Vyatkin A. A Computational Realization of a Semi-Lagrangian Method for Solving the Advection Equation // Journal of Applied Mathematics. 2014. Vol. 2014. Article ID 610398. doi: 10.1155/2014/610398.

2. Shaydurov V., Vyatkin A. The Semi-Lagrangian Algorithm Based on an Integral Transformation // AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1648. Article ID 850041. doi: 10.1063/1.4913096.

## **Graph-theory methods and systems of programming**

*V. N. Kasyanov*

The graph-theory methods and systems being under development at Laboratory for Program Construction and Optimization of IIS are presented [1-3]. The Wiki GRAPP and WEGA systems intended to help in teaching and research in graph theory and its applications to programming are described. The Higes and Visual Graph systems for visualization of graph models and algorithms are presented. The CSS system based on graph presentations of functional and parallel programs and aimed at supporting of cloud supercomputing is considered.

The author is thankful to his colleagues.

The work has been partially supported by the RFBR under grant N 15-07-02029.

References

1. Kasyanov V. N., Evstigneev V. N. Graphs in Programming: Processing, Visualization and Application. BHV-Petersburg: St. Petersburg, 2003. (In Russian)

2. Kasyanov V. N., Kasyanova E. V. Information visualization based on graph models // Enterprise Information Systems. 2013, V. 7, N 2, P. 187-197.

3. Kasyanov, V. N. Sisal 3.2: functional language for scientific parallel programming // Enterprise Information Systems. 2013, V. 7, N 2, P. 227-236.

## **Модель и визуальное представление численных алгоритмов для системы фрагментированного программирования**

*С. Е. Киреев, В. Г. Сарычев*

На базе существующей модели фрагментированного алгоритма, использующейся в системе фрагментированного программирования LuNA [1], разработана новая модель алгоритма, которая превосходит существующую по ряду критериев:

– наглядность: модель имеет визуальное представление и позволяет наглядно отобразить алгоритм с произвольной степенью детализации, что даёт возможность создания системы визуального программирования;

– устойчивость к ошибкам: элементы новой модели предоставляют меньше возможностей ошибиться при конструировании алгоритмов, а также упрощают автоматический анализ корректности алгоритма;

– прозрачность для автоматического анализа: ряд свойств алгоритма, существенных для его эффективного исполнения, в новой модели выражен явно, что позволяет их использовать для оптимизации генерируемой по алгоритму программы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31328, 14-07-00381).

Список литературы

1. Malyshkin V.E., Perepelkin V.A. LuNA Fragmented Programming System, Main Functions and Peculiarities of Run-Time Subsystem // PaCT-2011 proceedings, Springer, LNCS 6873 (2011), pp. 53-61.

### **Computer programs for statistical analysis of CTCF binding sites and chromosome contacts in genome obtained by ChIA-PET and Hi-C technologies**

*E V. Kulakova, G. Li, Y. L. Orlov*

Three-dimensional (3D) chromatin structure provides a landscape for expression of gene biological functions. The recent development of genome-wide proximity ligation assays such as Hi-C and its variant TCC has significantly facilitated the study of spatial genome organization. The Hi-C technology could capture all the interactions but with relatively low resolution. The ChIA-PET (Chromatin Interaction Analysis with Paired-End-Tag sequencing) technology greatly enhances the resolution. It can identify the interactions mediated by a known protein. So, ChIA-PET data can be used to conduct more intense 3D genome modeling. It is an unbiased, genome-wide, high-throughput and de novo method. ChIA-PET provides a solid foundation for studying long-range chromatin interactions in a 3D manner, as well as provides a more reliable way to determine TF binding sites and identify chromatin interactions. Development of new computer tools for 3D genome modeling is necessary.

The aim of the work was to develop a computer program for statistical data analysis and test it on CTCF binding sites, genes and spatial topological domains. These data have been obtained experimentally by using Hi-C and ChIA-PET methods. We used data on the spatial domains in the genome in mouse embryonic stem cells (<http://promoter.bx.psu.edu/hi-c/>) and data on the location of CTCF binding sites clusters obtained by ChIA-PET (<http://insulatordb.uthsc.edu/>). Gene annotation was obtained from UCSC Genome Browser (<http://genome.ucsc.edu>).

The program processes the data and calculates the distribution of CTCF transcription factor binding sites on domains on the human chromosomes. The distributions of human genes relative to CTCF binding sites pairs and a random list of genome loci of the same sizes the program output were used to estimate statistical significance of the associations found.

In this work we introduce a model of genes location in genome relative to chromatin loops formed by CTCF binding sites. On the experimental data sites of 50 % of the genes refers to a group "inside loop" in contrast to 28 % on the simulated data. Chromatin interaction network is organized into "community", and genes within community perform related functions and respond to external stimuli in a coordinated manner, which means these communities may have been shaped during millions of years' evolution.

The work was supported by ICG SB RAS budget project VI.61.1.2, by RFBR (grants no. 14-04-01906, 14-04-01707).

#### References

1. G. Li et al. Chromatin Interaction Analysis with Paired-End Tag (ChIA-PET) sequencing technology and application, BMC Genomics, 2014, 15(Suppl 12):S11
2. R. Kalhor et al. Genome architectures revealed by tethered chromosome conformation capture and population-based modeling. Nat. Biotechnol., 2012, 30, 90–98
3. MJ Fullwood, et al. An oestrogen-receptor-alpha-bound human chromatin interactome, Nature, 2009, 462(7269):58-64
4. L. Handoko et al. CTCF-mediated functional chromatin interactome in pluripotent cells, Nat Genet, 2011, 43(7):630-638
5. G. Li et al. Extensive promoter-centered chromatin interactions provide a topological basis for transcription regulation, Cell, 2012, 148(1-2):84-98

6. Kulakova Ye., Spitsina A., Orlova N., Dergilev A., Svichkarev A., Safronova N., Chernykh, I., Orlov Yu. Programs for analysis of genome sequencing data obtained using ChIP-seq, ChIA-PET and Hi-C technologies // Program systems: theory and applications, 2015, 6:2(25), 129-148

### **Задача календарного планирования производства большой размерности**

*О. А. Ляхов*

Задача заключается в выборе заказов из предварительного списка и построении для них календарного плана. Модель отображает следующие условия: каждая операция (работа) начинается после завершения всех предшествующих ей работ; потребность в ресурсе не превышает его наличия во всех интервалах времени; обязательное соблюдение директивных дат изготовления некоторых заказов; обязательное включение в производственный план заказов обязательной номенклатуры при равномерной загрузке оборудования и производственного персонала. Особенностью задачи является совмещение выбора заказов с построением календарных планов для реальных объектов дискретного производства в отличие от известных систем сетевого планирования, в которых эти задачи разделены [1, 2]. Задача календарного планирования производства не имеет практически пригодных точных методов решения. Для реальных производственных объектов разработаны методы случайного поиска решения календарных задач.

Список литературы

1. [Electron. resource]. <http://www.primavera.com>.
2. [Electron. resource]. <http://microsoftproject.ru>.

### **Эволюционный подход к решению задач оптимизации маршрутов прокладки инженерных сетей**

*О. Г. Монахов, Э. А. Монахова, Г. Ы. Токтошов*

В работе рассматривается задача построения оптимальной структуры инженерных сетей и поиска трасс прокладки физических линий, обеспечивающих минимальную суммарную стоимость строительства и эксплуатации инженерных сетей. Приведена математическая постановка задачи оптимизации структуры инженерных сетей и выведена целевая функция для минимизации затрат. Показана связь данной задачи с классической задачей Штейнера. Для решения поставленной задачи предложен метод дифференциальной эволюции. Проведены вычислительные эксперименты на цифровых картах реальной местности и получены оценки эффективности, показывающие преимущества предложенного подхода.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00031, 14-01-92694).

### **An implementation of accelerator for cellular automata models using FPGA technology**

*M. Ostapkevich, A. Aillet, A. Gougeon*

The description of a matrix coprocessor for cellular automata (CA) models is given in the report. The coprocessor supports classical cellular automata and its certain extensions. CA models make it possible to simulate some natural processes even when their traditional numerical computation methods fail. Such models have a number of advantages in comparison to numerical models, e.g. they do not have problems related to precision and error accumulation. But on the other hand, nearly any real world CA model requires an enormous amount of computations and big size of model data. One of the ways to attain a descent simulation time is to use a massively parallel and pipe-lined implementation of CA simulation using FPGA technology, which is widely applied to the computations for the last two decades. The technology permits to attain a very high performance solution due to the massively parallel fine-grain nature of FPGAs. It is also worthy to note that a typical modern cluster node often includes one or more FPGAs. Thus, hybrid MPI-FPGA implementations can be constructed. The first part of the report is dedicated to a simple scalar processor, which has a modular and extensible architecture and serves as the basis for the construction

of the matrix coprocessor. It is followed by the description of architecture and organization of the matrix coprocessor as well as a number of CA models built using this coprocessor.

The work has been partially supported by project contract 14-07-00381.

### **Efficient numerical algorithms for some models**

*M. B. Ostapkevich, E. G. Kostsov*

The physical principles of construction of 3D IC-s with optical intercommunications as well as the cellular technology of organization of logical operations in optical communications were presented earlier in [1-2]. The technology named Parallel Substitution Algorithm is based on execution of elementary logical functions representing distributed computations [3]. The foundations of 3D scheme design using WinALT simulation environment are outlined in [1-2]. The architecture of data visualization system, which is a part of WinALT simulation environment [4], is presented in the report. The data of 3D scheme models have huge dimensions, versatility and structural complexity. This implies that the visualization system has to be functionally extensible. A user needs to have means to add new visualization modes or adjust particular aspects of existing visualization modes.

The work has been partially supported by project contract 14-07-00381.

#### References

1. E.G. Kostsov, S.V. Piskunov, M.B. Ostapkevich. 3D ICs with Optical Interconnections // Optical Communication, ed. by Narottam Das, InTech, Croatia, 2012, Chapter 4, P. 55-82.
2. E.G. Kostsov, S.V. Piskunov, Computer design of two layer computational matrix with optical interconnections. Avtometriya, 2000, v. 3, P. 3-16 (in Russian).
3. S. Achasova, O. Bandman, V. Markova and S. Piskunov. Parallel Substitution Algorithm. Theory and Application. - Singapore: World Scientific, 1994.
4. Ostapkevich M., Piskunov S., The Construction of Simulation Models of Algorithms and Structures with Fine-Grain Parallelism in WinALT // Lect. Notes in Comput. Sci. – Springer-Verlag. - Berlin Heidelberg. - 2011. - Vol. 6873. - P 192-203.

### **Фреймворк для создания высокоуровневых предметно-ориентированных систем программирования**

*В. Г. Сарычев*

В основе фреймворка лежит теория о вычислительных моделях и структурном синтезе на вычислительных моделях [1] позволяющем автоматизировать процесс вывода алгоритмов и программ по формальным спецификациям задачи в терминах предметной области. В работе рассматривается подход к разработке предметно-ориентированных систем для визуального конструирования параллельных программ. Разработан прототип фреймворка для создания предметно-ориентированных систем конструирования алгоритмов и программ. Фреймворк состоит из визуального конструктора, модуля вывода алгоритмов, библиотеки для накопления описаний вычислительных моделей и алгоритмов, а также исполнительной системы [2].

#### Список литературы

1. Вальковский В.А., Малышкин В.Э. Синтез параллельных программ и систем на вычислительных моделях. - Издательство "Наука", Сибирское отделение, Новосибирск, 1988г., 129 стр.
2. В. Г. Сарычев, А. Б. Купчишин. Разработка программного комплекса для конструирования программ обработки данных на высокопроизводительных вычислительных системах // Седьмая Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям / Под ред. проф. А.В. Старченко. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 146 с, – С. 55-64.

### **О полноте поддержки разработки математических моделей**

*И. Н. Скопин*

Полнота поддержки разработки программ и, в частности, математических моделей является одним из основных факторов, способствующих качеству как результата проекта, так и процесса его



выполнения. Если поддержка не предусматривает средства, обеспечивающие разработчиков во всех аспектах проектной деятельности, то неизбежны узкие места, преодоление которых может потребовать существенных дополнительных трудозатрат.

Решение проблемы видится в комплексной разработке системы поддержки моделирования, которая предлагает средства, ориентированные на использование на каждом этапе жизненного цикла построения и использования модели, а также верификацию принимаемых решений с учетом специфики данных, передаваемых от этапа к этапу. Конструирование такой системы целесообразно организовать путем постепенного наращивания ее возможностей, потребность которых демонстрируют процессы решения реальных задач моделирования. Этот подход предлагает Базовая система моделирования (БСМ), разрабатываемая в Лаборатории вычислительной физики ИВМиМГ СО РАН [1]. Развитие проекта осуществляется таким образом, чтобы максимально быстро предлагать разработчикам моделей подсистемы, которые могут быть использованы автономно. Эта стратегия позволяет накапливать опыт для выработки стандартов, которым должны отвечать новые подключаемые к БСМ компоненты. В настоящее время характерным примером разработки такой подсистемы, готовой к использованию может служить библиотека алгебраических решателей Krylov [2].

В докладе обсуждается, каким образом реализуется концепция полноты поддержки разработки математических моделей в проекте БСМ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-11-00485 "Высокопроизводительные методы и технологии моделирования электрофизических процессов и устройств").

Список литературы

1. Ильин В.П., Скопин И.Н. Технологии вычислительного программирования // Программирование. — № 4, 2011. Т. 47. № 306. С. 53–72.
2. Бутюгин Д.С., Гурьева Я.Л., Ильин В.П., Перевозкин Д.В., Петухов А.В., Скопин И.Н. Функциональность и технологии алгебраических решателей в библиотеке Krylov // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2013. Т. 2. № 3. С. 92–105.

## **Прямое управление и оптимизация исполнения фрагментированных программ**

*А. А. Ткачёва*

Рассматривается проблема эффективного исполнения фрагментированных программ (ФП) в системе фрагментированного программирования LuNA [1]. Предложены средства задания прямого управления в виде предикатной сети Петри [2] и в виде монолитизированных циклов типа `for` для уменьшения непроцедурности представления ФП и для выбора оптимальных или субоптимальных вариантов исполнения ФП на заданном вычислителе и входных данных.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31328, 14-07-00381).

Список литературы

1. Malyshkin V., Perepelkin V. Optimization methods of parallel execution of numerical programs in the LuNA fragmented programming system // The Journal of Supercomputing. 2012. V. 61, iss. 1. P. 235-248.
2. Ткачёва А.А. Средства для задания императивного управления во фрагментированных программах на примере задачи моделирования самогравитирующегося вещества методом частиц в ячейках // VII сб. конф. по параллельным и высокопроизводительным вычислениям: материалы конференции, Томск: изд-во ТГУ, 2014, с 68-75 Управление распределенными данными и вычислениями в системе фрагментированного программирования LUNA

## **Управление распределенными данными и вычислениями в системе фрагментированного программирования LuNA**

*Г. А. Жукин, В. А. Перепелкин*

Система фрагментированного программирования LuNA [1,2] предназначена для разработки параллельной реализации крупномасштабных численных моделей. Фрагментированная программа

(ФП) не содержит привязки к ресурсам, что позволяет запускать ее на вычислительных машинах с различной архитектурой. Исполнение ФП на конкретной машине (в том числе мультикомпьютере) обеспечивает исполнительная подсистема [2, 3].

Эффективность исполнения ФП на мультикомпьютере с распределенной памятью во многом зависит от способов распределения данных и вычислений по процессорным элементам, определения и выбора готовых к срабатыванию вычислений и т.д. В работе описываются разработанные авторами для системы LuNA алгоритмы управления распределенными данными и вычислениями и приводятся результаты тестов производительности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-07-00381 а и 14-01-31328 мол\_а).

#### Список литературы

1. Malyshkin V., Perepelkin V. Optimization methods of parallel execution of numerical programs in the LuNA fragmented programming system // *The Journal of Supercomputing*. 2012. V. 61, iss. 1. P. 235-248.
2. Malyshkin V., Perepelkin V. LuNA Fragmented Programming System, Main Functions and Peculiarities of Run-Time Subsystem // *PaCT 2011*. Springer, 2011, LNCS V. 6873. P. 53-61.
3. K.V. Kalgin, V.E. Malyshkin, S.P. Nechaev, G.A. Tschukin. Runtime System for Parallel Execution of Fragmented Subroutines // *PaCT 2007*. Springer, 2007, LNCS V. 4671. P. 544-552.

## Секция 7. ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ

### О связи сопряженных параметров с информацией

*А. К. Алексеев*

Идея Г.И. Марчука о связи сопряженных параметров с информацией ("функция ценности информации", [1]) может быть конструктивно использована в теории информации.

Определение информации Шеннона ориентировано исключительно на проблемы передачи, без связи с содержанием. Однако, как в научных кругах, так и на бытовом уровне, широко используются интуитивные понятия "ценной информации", связанные с "рецептами", "инструкциями", "знанием" и его ценностью и т.д. [2]. В ряде обратных задач, таких как задачи вариационного усвоения данных, такую "ценную информацию" можно формализовать. Она имеет векторную и тензорную составляющие. Векторная компонента, координаты цели в пространстве управляющих параметров, связана с градиентом целевого функционала линейным преобразованием. Тензорная компонента, задающая неопределенность достижения цели, это информационная матрица Фишера. Информации Шеннона и Фишера являются ее скалярными инвариантами.

Сопряженные параметры соответствуют векторной компоненте "ценной информации", при этом сопряженные уравнения описывают ее рождение и перенос. Неясности физического смысла сопряженных параметров вызваны не столько проблемами их трактовки, сколько отсутствием количественной формулировки используемого на интуитивном уровне понятия "ценной информации".

Список литературы

1. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992
2. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации М.: УРСС, 2004

### Методы оптимального управления в задачах материальных тел на основе волнового обтекания

*Г. В. Алексеев, А. В. Лобанов, Ю. Э. Спивак*

В последние годы значительное внимание уделяется дизайну устройств, служащих для маскировки материальных тел. Начиная с 2006 г, развитию различных методов маскировки посвящено большое количество работ. Нужно отметить, что решения задач маскировки, полученные указанными методами, обладают рядом недостатков. Основным недостатком является трудность технической реализации полученных решений. Чтобы упростить проблему технической реализации полученных решений, в работе предлагается заменить задачу построения точной маскировочной оболочки приближенной задачей построения слабо рассеивающей оболочки. Параметры среды, заполняющей эту оболочку, должны изменяться в некотором допустимом классе функций, допускающих относительно простую техническую реализацию. Они выбираются из условия минимума некоторого функционала качества, зависящего от рассеянного поля. На основе указанной идеи в работе развивается оптимизационный метод решения задач маскировки. Обсуждаются теоретические и вычислительные аспекты метода. Метод применяется при решении задач дизайна цилиндрической либо сферической маскировочных оболочек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00313-а).

### Реконструкция характеристик изотопных систем образцов горных пород и минералов

*Д. В. Алексеев, А. В. Травин*

Многие измеряемые характеристики изотопных систем образцов горных пород и минералов связаны с истинными уравнением Фредгольма первого рода. С учётом особенностей задачи предложен численный алгоритм решения данного уравнения. Интегральное уравнение сводится к систе-

ме линейных алгебраических уравнений путём замены искомой функции разложением в ряд Фурье по функциональному базису и действия на обе части полученного равенства линейными функционалами. Данный подход обеспечивает повышение обусловленности получаемой системы уравнений и упрощает регуляризацию решения, а также позволяет снизить объём вычислений. Рассмотрена возможность повышения обусловленности системы уравнений путём выбора функционального базиса и системы линейных функционалов. Выполнена реконструкция возрастного спектра амфибола из эскарпов поднятия Менделеева. Строение земной коры северного ледовитого океана представляет интерес в связи с установлением границ шельфа и подачей соответствующих заявок в комиссию ООН [1].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-05-00712а).

#### Список литературы

1. Верниковский В.А., Морозов А.Ф., Петров О.В., Травин А.В., Кашубин С.Н., Шокальский С.П., Шевченко С.С., Петров Е.О. Новые данные о возрасте долеритов и базальтов поднятия Менделеева: к проблеме континентальной коры в северном ледовитом океане // Доклады академии наук. 2014. Т. 454, №4. с. 431-435.

### **Problems of few-projection tomography**

*D. S. Anikonov*

The report is devoted to the review of the investigations of Anikonov D.S., Nazarov V.G. and Prokhorov I.V. for few-projection tomography, when only a small number of projections can be recorded. In this case the possibility of full image reconstruction becomes ambiguously determined. However, it is possible to solve some other problems such as the determination of boundaries of inclusions inside an unknown medium. In the observed papers [1-3] new integro-differential operators for processing the available information are proposed. These articles contain theoretical justifications of the algorithms and results of the numerical experiments. The methods proposed by Anikonov D.S., Nazarov V.G. and Prokhorov I.V. are compared with the method of D. Marr, E. Hildreth [4].

The author is supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 13-01-00275-a)

#### References

1. Anikonov D.S., Nazarov V.G., Prokhorov I.V. Algorithm of finding a body projection within an absorbing and scattering medium, *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, Vol. 19, Issue 2(2011), pp. 11–19.
2. Anikonov D.S., Nazarov V.G. Problem of Two-Beam Tomography, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, Vol.52, Issue 3(2012), pp. 372–378.
3. Anikonov D. S., Nazarov V.G., Prokhorov I.V. The integro-differential indicator for a problem of single-beam tomography, *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, Vol. 8, Issue 3(2014), pp. 1-8.
4. D. Marr, E. Hildreth Theory of Edge Detection, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 207, Issue 1167(1980), pp. 187-217.

### **Метод искусственных нейронных сетей в обратной задаче аномальной диффузии**

*А. Н. Бондаренко, В. А. Дедок*

Данная работа продолжает исследование обратной задачи для уравнения аномальной диффузии методами искусственных нейронных сетей, начатое в [1]. Рассматривается краевая задача для уравнения диффузии дробного порядка по времени. Обратная задача состоит в определении порядка дробного дифференцирования и коэффициента среды по данным решения уравнения на некоторой прямой, измеряемым в дискретные моменты времени.

В качестве основного инструмента исследований выбраны нейронные сети типа многослойный перцептрон. Рассматриваются различные конфигурации перцептронов, исследуется влияние внесенного измерительными приборами шума на точность определения параметров задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00208), гранта мэрии г. Новосибирска молодым ученым и специалистам.

## Список литературы

1. Bondarenko A.N., Dedok V.A. Neural network approach for inverse fractional diffusion problem. International conference "Advanced mathematical computations and applications" - 2014, 8-11 June, Novosibirsk, p.54.

### **Обратная спектральная задача для интегро-дифференциальных операторов с условием разрыва**

*С. А. Бутерин*

В данной работе рассматривается краевая задача для интегро-дифференциального уравнения первого порядка со сверточным слагаемым на конечном интервале и с условием разрыва во внутренней точке интервала. Исследуется обратная задача восстановления сверточного слагаемого, а также коэффициента в краевом условии по спектру рассматриваемой краевой задачи.

Обратные спектральные задачи для интегро-дифференциальных операторов без условий разрыва исследовались в [1–3] и других работах. Краевые задачи с условиями разрыва внутри интервала часто возникают в различных областях естествознания и техники. В частности, обратные задачи для дифференциального оператора Штурма – Лиувилля с условиями разрыва исследовались в [4, 5]. Появление условий разрыва в математической модели обычно связано с разрывными или негладкими свойствами среды. Отметим, что обратные задачи для интегро-дифференциальных операторов в силу их трудности исследованы мало, а с условиями разрыва еще не исследовались.

Доказывается теорема единственности решения рассматриваемой обратной задачи, и получены необходимые и достаточные условия ее разрешимости в терминах асимптотики спектра. Доказательство конструктивно и дает алгоритм восстановления сверточного слагаемого.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-04864, 13-01-00134) и Минобрнауки РФ (код проекта 1.1436.2014К).

## Список литературы

1. Юрко В.А. Обратная задача для интегро-дифференциальных операторов // Математические заметки. 1991. Т.50. Вып.5. С.134–144.

2. Buterin S.A. On an inverse spectral problem for a convolution integro-differential operator // Results in Mathematics. 2007. V.50. №3-4. P.173–181.

3. Бутерин С.А. О восстановлении сверточного возмущения оператора Штурма – Лиувилля по спектру // Дифференциальные уравнения. 2010. Т.46. №1. С.146–149.

4. Юрко В.А. О краевых задачах с условиями разрыва внутри интервала // Дифференциальные уравнения. 2000. Т.36., №8. С.1139–1140.

5. Freiling G., Yurko V. Inverse spectral problems for singular non-selfadjoint differential operators with discontinuities in an interior point // Inverse Problems. 2002. V.18. P.757–773.

### **Обратные задачи для уравнения переноса с точки зрения обратных задач гравиметрии**

*А. Л. Бухгейм, А. А. Бухгейм*

В докладе исследуются обратные задачи определения коэффициента поглощения и правой части двумерного стационарного уравнения переноса по данным Коши на границе. Показывается, что эти задачи сводятся к обратным задачам определения правой части соответствующего операторного аналога неоднородного уравнения Коши – Римана. Соображения двойственности, аналогичные используемым в обратных задачах гравиметрии, приводят к алгоритмам восстановления соответствующего коэффициента поглощения и правой части уравнения переноса. Приводятся результаты численных расчётов. Уравнение переноса рассматривается также в векторном варианте. В этом случае коэффициент поглощения будет матричным.

### **Итерационное решение некоторых обратных задач для гиперболических уравнений второго порядка**

*В. И. Васильев, А. М. Кардашевский*

Исследованию существования и единственности решения и численным методам решения обратной задачи Дирихле посвящен цикл работ научной школы С.И.Кабанихина. Для численного решения ретроспективной обратной задачи теплопроводности, аналогу задачи Дирихле для параболического уравнения



ческого уравнения, академик А.А.Самарский с учениками предложил итерационный метод заключающийся в уточнении начального условия итерационными методами вариационного типа.

В докладе рассматривается численное решение неклассической задачи Дирихле и ее модификаций для уравнения гиперболического типа второго порядка. Используются методы итерационного уточнения недостающего начального условия с помощью дополнительного условия в конечный момент времени. При этом на каждой итерации численно реализуется прямая задача. Эффективность предлагаемого вычислительного алгоритма подтверждена расчетами для модельных одномерных и двумерных задач, в том числе и со случайными погрешностями во входных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00719).

### **Регуляризованные градиентные методы для аппроксимации решений нелинейных некорректных задач**

*В. В. Васин*

Для построения устойчивой аппроксимации решения некорректной обратной задачи, формулируемой в виде операторного уравнения на паре гильбертовых пространств предлагается следующий двухэтапный метод:

- на первом этапе исходное уравнение регуляризуется по схеме Лаврентьева – Тихонова;
- на втором этапе для аппроксимации решения регуляризованного уравнения привлекаются модифицированные методы градиентного типа – нелинейные аналоги методов наискорейшего спуска и минимальной ошибки [1, 2]. Модификация градиентных методов заключается в том, что производная в операторе шага вычисляется в фиксированной точке (начальном приближении) в течение всего итерационного процесса. Это позволяет повысить экономичность исходных градиентных методов для некоторых классов операторных уравнений по числу операций для достижения одной и той же точности. Устанавливаются свойства фейеровости итераций, регуляризующее свойство двухэтапного метода и его оптимальность на классах корректности. Обсуждаются приложения методов к обратным задачам геофизики и термического зондирования атмосферы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-01-00629, 15-01-05984).

Список литературы

1. Vasin V.V. Modified steepest descent method for nonlinear irregular operator equations // Dokl. Math. 2015. Vol. 91, No. 3. P.300-303. DOI S10664562415030187.
2. Vasin V.V. Irregular nonlinear operator equations: Tikhonov regularization and iterative approximation // J. Inv. Ill-Posed Problems. 2013. Vol. 21, No. 1. No 1. P. 109-123. DOI 10.1515/jip-2012-0084.

### **О корректности некоторых обратных задач для уравнения смешанного типа в пространстве**

*С. З. Джамалов*

В процессе исследования нелокальных, интегральных краевых задач была выявлена тесная взаимосвязь с обратными задачами. К настоящему времени достаточно хорошо изучены обратные задачи для уравнений параболического, эллиптического и гиперболического типов [1,2,3,5,6]. Значительно менее изученными являются обратные задачи для уравнений смешанного типа, как первого, так и второго рода [7]. Частично восполнить последний пробел мы, и попытаемся в рамках этой работе. В данной работе доказаны корректности некоторых обратных задач для уравнения смешанного типа второго порядка, как первого, так и второго рода в определенных классах.

Список литературы

1. Аниконов Ю.Е. Некоторые методы исследования многомерных обратных задач для дифференциальных уравнений. Новосибирск. Наука, 1978.-120с
2. Бубнов. Б. А. К вопросу о разрешимости многомерных обратных задач для параболических уравнений. Новосибирск. 1987. Препринт №713, ВЦ. СО АН СССР. с.41

3. Бубнов. Б. А. К вопросу о разрешимости многомерных обратных задач для гиперболических уравнений. Новосибирск. 1987. Препринт №713, ВЦ. СО АН СССР. с.41

4. Врагов В.Н. Краевые задачи для неклассических уравнений математической физики. Новосибирск. НГУ.1983.с.84.

5. Лаврентьев М.М, Романов В.Г, Васильев В.Г. Многомерные обратные задачи для дифференциальных уравнений. Новосибирск. Наука,1969. 67

6. Кожанов А.И. Нелинейные нагруженные уравнения и обратные задачи. Журн. вычислит. математики и мат. физики. 2004. Т. 44, № 4. С. 694–716.

7. Сабитов К.Б., Мартемьянова Н.В. Нелокальная обратная задача для уравнения смешанного типа.// Известия вузов. Математика.2011.№2.с.71-85.

### **Приближенное решение обратной задачи физики твердого тела**

*А. А. Ершова, В. П. Танана*

Связь энергетического спектра бозе-системы с ее теплоемкостью, зависящей от температуры, описывается интегральным уравнением первого рода

$$Sn(s) = \int_a^b K(s,t)n(s)ds = \frac{f(t)}{t}; \quad 0 < t \leq \infty. \quad (1)$$

Предположим, что при  $f(t) = f_0(t)$  существует точное решение  $n_0(s)$  уравнения (1), которое принадлежит множеству  $M$ , где

$$M = \left\{ n(s) : n(s), \quad n'(s) \in L_2[a, b], \quad n(a) = 0 \right\}$$

Пусть точное значение  $f_0(t)$  нам неизвестно, а вместо него даны  $f_\delta(t) \in L_2(0, \infty)$ ,  $\delta > 0$  такие, что

$$\left\| \frac{f_\delta(t)}{t} - \frac{f_0(t)}{t} \right\|_{L_2} < \delta.$$

По  $f_\delta(t)$ ,  $\delta$  и  $M$  определено приближенное решение  $n_\delta(t)$  и получена оценка его отклонение от точного решения  $n_0(t)$  в метрике пространства  $L_2[a, b]$ .

Для решения (1) использовался метод регуляризации А.Н. Тихонова первого порядка, а параметр регуляризации выбирался из обобщенного принципа невязки.

### **Некорректная задача для уравнения Пуассона**

*К. Б. Иманбердиев, К. А. Айменова*

В этой статье мы рассмотрим краевую задачу в ограниченной двумерной прямоугольной области для уравнения Пуассона с дополнительным условием. Изучаемая некорректная краевая задача сводится к задаче оптимального управления. В терминах решения сопряженной граничной задачи установлены необходимые и достаточные условия оптимальности. Найден критерий сильной разрешимости некорректной граничной задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (код проекта 0823/ГФ4).

Список литературы

1. Адамар Ж. Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа. М.: Наука, 1978. 352 с.

2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 142 с.

3. Лаврентьев М.М. // Известия АН СССР. Серия математика. 1956. Т.20, №6. С. 819–842.

4. Lattes R., Lions J.-L. Methode de quasireversibilite et applications. Paris: Dunod, 1967. 336 с.

5. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. 457 с.

**Оптимизационный метод решения одной одномерной обратной задачи пороупругости**

*Х. Х. Имомназаров, А. С. Бердышев, А. Э. Холмурадов*

В работе изучается задача определения модуля сдвига, зависящего от скорости деформации (при заданных коэффициентах проницаемости, пористости, плотностей упругого пористого тела и жидкости), из одномерной динамической системы уравнений пороупругости по дополнительной информации скорости смещений упругого пористого тела на свободной поверхности [1, 2]. Доказана теорема локальной разрешимости классического решения прямой задачи. Доказана дифференцируемость по Фреше оператора прямой задачи. Получены оценки условной устойчивости рассматриваемой обратной задачи.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00689), грантом Президента РФ НШ-5666.2014.5 и грантом КН МОН РК (номер гранта 3328/ГФ4).

Список литературы

1. Imomnazarov Kh.Kh., Kholmurodov A.E. Direct and inverse dynamic problems for SH-waves in porous media // Mathematical and Computer Modelling. 2007. V.45. No.3-4. pp.270-280.
2. Imomnazarov Kh.Kh., Imomnazarov Sh.Kh., Korobov P.V., Kholmurodov A.E. About one direct initial-boundary value problem for nonlinear one-dimensional poroelasticity equations // Bull. Of the Novosibirsk Computing Center, series: Mathematical Modeling in Geophysics, Novosibirsk, 2015, № 18, pp.1-8.

**Итерационные методы в малоракурсной спектральной томографии**

*И. Г. Казанцев*

В задачах малоракурсной томографии недостаток проекционных данных можно компенсировать использованием детекторов с высоким спектральным разрешением. В работе обсуждается проблема эмиссионной томографии с неполным углом просвечивания и ее решение итерационными вариационными методами. Улучшение точности реконструкции основано на том, что проекции, регистрируемые в различных спектральных диапазонах, содержат дополнительные интегральные данные об объекте вдоль лучей, отсутствующих при использовании монохроматических детекторов. Рассматривается задача ускорения сходимости итерационного процесса с помощью выбора порядка обработки проекций.

Результаты томографической реконструкции иллюстрируются.

Работа поддержана проектом РФФИ 13-07-00068.

**Расчёт теплового потока в области контактной линии стенка – жидкость – пар**

*А. Л. Карчевский, И. В. Марчук*

Изучается процесс переноса в области динамической трехфазной контактной линии стенка – жидкость – пар. Экспериментально исследовались испаряющиеся капли воды, сидящие на горизонтальной нагреваемой подложке, в качестве которой использовалась константановая фольга. Температура нижней поверхности фольги измерялась тепловизором. Для определения плотности теплового потока на недоступной для измерений части границы по полученным температурным данным используется известный метод нагреваемой тонкой фольги. В отличие от традиционного подхода, в настоящей работе теплопроводностью вдоль фольги не пренебрегается. Поэтому, для того чтобы определить значение теплового потока на недоступной для измерений части границы, решается задача продолжения теплового поля, которая математически классифицируется как задача Коши для эллиптического уравнения. Численные расчеты задачи Коши выполнены с использованием данных, полученных в эксперименте. Обнаружено, что в области контактной линии наблюдается локальный максимум плотности теплового потока, который объясняется высокой интенсивностью теплообмена из-за испарения и притоком тепла с периферии фольги.

Работа первого автора поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00208), работа второго автора поддержана Российским научным фондом (код проекта 14-19-01755).

### **Модели распознавания объектов земной поверхности по данным дистанционного гиперспектрального зондирования**

*В. В. Козодеров, Е. В. Дмитриев, В. Д. Егоров*

Основу распознавания объектов с помощью машино-обучающих алгоритмов на высокопроизводительных компьютерах составляют методы оптимизации спектральных и пространственных признаков, извлекаемых из обрабатываемых гиперспектральных изображений (сотни спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной области). На примерах распознавания объектов лесного покрова разного породного состава и возраста реализуются вычислительные процедуры описания текстуры таких классов объектов вместе с нахождением тонких нюансов их спектрального распределения в многомерном признаковом пространстве. В результате устраняется возможная избыточность каналов гиперспектрального зондирования вследствие корреляции регистрируемых спектральных плотностей энергетической яркости в соседних каналах.

Исследования проводятся при финансовой поддержке ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 -2020 годы" (Соглашение №14.575.21.0028 о предоставлении субсидии, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57514X0028) и Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-01-00185, 14-05-00598, 14-07-00141, 15-01-00783).

Список литературы

1. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Sokolov A.A. Retrieval of forest stand attributes using optical airborne remote sensing data // Optics Express. 2014. V. 22. No. 13. P. 15410-15423.

2. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. A system for processing hyperspectral imagery: application for detecting forest species // International Journal of Remote Sensing. 2014. V. 35. No. 15. P. 5926-5945.

3. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. Bayesian classifier applications of airborne hyperspectral imagery processing for forested areas // Advances in Space Research. 2015. V. 55. No. 11. P. 2657-2667.

### **Математическое моделирование каталитической реакции взаимодействия спиртов с диметилкарбонатом**

*К. Ф. Коледина, С. Н. Коледин*

В работе представлено математическое моделирование реакции синтеза алкилметиловых эфиров и алкилметилкарбонатов, посредством реагентов, неопасных для окружающей среды ("зеленая химия"). В качестве математической модели, описывающей реакцию по закону действующих масс принята система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, с неизвестными параметрами – константы скорости и энергии активации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-07-01764 А).

Список литературы

1. Губайдуллин И.М., Коледина К.Ф., Спивак С.И. Последовательно-параллельное определение кинетических параметров / Журнал средневожского математического общества. 2009. Т. 11. № 2. с. 14-25.

2. Коледин С.Н., Коледина К.Ф., Губайдуллин И.М. Кинетика реакции в исследовании экономической эффективности химического производства/В сборнике: Математическое моделирование процессов и систем сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор С.А. Мустафина. 2014. с. 30-34.

### **Алгоритм стабилизации объекта с хаотическими режимами на заданном многообразии**

*С. И. Колесникова*

Рассматривается задача обобщения метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов на случай управления плохо формализуемым объектом на многообразиях в условиях

неопределенности. Дается сравнительный обзор условий применимости двух методов управлений на многообразиях и иллюстрируется свойство робастности данных методов в условиях немоделируемой динамики. Приводится теоретическое обоснование алгоритма синтеза регулятора с компенсацией возмущений, построенного на принципах синергетической теории управления (на многообразиях). Получены результаты численного моделирования и апробации работы такого регулятора в условиях немоделируемой динамики (аддитивных случайных помех).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-08-01015).

Список литературы

1. Красовский А.А. Математическая и прикладная теория. Избранные труды. М.: Наука, 2002.
2. Халил Х.К. Нелинейные системы: монография. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2009.
3. Колесников А.А. Синергетика и проблемы теории управления: сборник научных трудов / Под ред. А.А. Колесникова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

### **Специальная задача зондирования на основе гиперболической системы дифференциальных уравнений**

*Д. С. Коновалова*

Рассматривается обратная задача для гиперболической системы двух дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка с двумя независимыми переменными. Предполагается, что правые части рассматриваемой системы являются разрывными функциями. В обратной задаче требуется найти некоторую оболочку, содержащую линию разрывов правых частей. Предварительно рассматривается соответствующая прямая задача. Доказывается существование и единственность ее обобщенного решения, исследуются дифференциальные свойства этого решения. В частности, показана неограниченность его частных производных первого порядка вблизи некоторых лучей, направленных вдоль характеристик. Это свойство лежит в основе предлагаемого алгоритма решения поставленной обратной задачи [1,2].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 13-01-00275.

Список литературы

1. Аниконов Д.С., Казанцев С.Г., Коновалова Д.С. Дифференциальные свойства обобщенного решения гиперболической системы уравнений первого порядка // Сибирский журнал индустриальной математики, 2013. Т. 16, №2(54). С. 26-39.
2. Аниконов Д.С., Казанцев С.Г., Коновалова Д.С. Обратная задача типа локации для гиперболической системы // Сибирский журнал индустриальной математики, 2013. Т. 16, №4(56). С. 3-20.

### **Определение характеристик лавового потока по измерениям физических параметров на его поверхности**

*А. И. Короткий, Д. А. Ковтунов, А. Т. Исмаил-Заде, О. Э. Мельник, И. А. Цепелев*

Рассматривается задача об определении характеристик потока вулканической лавы по измерениям некоторых физических параметров на поверхности лавы. Задача формализуется как обратная граничная задача для модели динамики вязкой теплопроводной несжимаемой неоднородной жидкости, когда по некоторым дополнительным данным на одной части границы области изменения независимых переменных требуется определить недостающие граничные данные на другой части границы, а затем, при необходимости, восстановить характеристики жидкости во всей области ее движения. Эту задачу можно трактовать также как задачу продолжения решения системы уравнений математической физики с части границы. Установлено, что рассматриваемая задача некорректно поставлена. Разработаны методы и алгоритмы решения рассматриваемой задачи. Подробно рассмотрен стационарный вариант задачи, в котором на доступной поверхности лавового потока измеряются температура и поток тепла, а нахождению подлежат поле температур и поле скоростей установившегося движения лавы во всей области. Для аналога метода Тихонова проведены расчеты



модельных примеров, которые для гладких исходных данных показали хорошие результаты. Будут представлены и обсуждены результаты численного анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-17-00520).

### **Оптимальные траектории над геофизическими полями**

*В. Б. Костоусов, В. И. Бердышев*

В связи с проблемой навигации автономно движущихся объектов по геофизическим полям ставятся экстремальные задачи поиска траектории из заданного "коридора" а) прилегающих над наиболее информативной частью геофизического поля, б) наиболее удаленных от заданного множества наблюдателей.

Даны характеристические свойства траекторий.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-11-00702).

Список литературы

1. В.И.Бердышев, В.Б.Костоусов. Экстремальные задачи и модели навигации по геофизическим полям.

### **Локальные апостериорные оценки точности разрывных решений некорректных обратных задач**

*А. С. Леонов*

Для решения нелинейных некорректно поставленных обратных задач с разрывными решениями применяются вариационные регуляризующие алгоритмы на классах функций нескольких переменных с ограниченными вариациями типа Харди и Джусты. Дается методика численных апостериорных оценок точности линейных функционалов от решений этих обратных задач. Такие "локальные" апостериорные оценки (ЛАО) введены в [1]. В докладе теория ЛАО развивается для случая некорректных задач с разрывными решениями. Дается численный алгоритм нахождения ЛАО. Для линейных обратных задач алгоритм сводится к решению специальных задач квадратичного программирования. Изложение иллюстрируется практическими расчетами апостериорных оценок точности средних значений приближенных решений (по заданной части их носителей) для двумерных ретроспективных обратных задач линейной теплопроводности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00182-а, 14-01-91151-ГФЕН-а).

Список литературы

1. Leonov A.S. Linear estimates of accuracy for approximate solutions of inverse problems // *Applicable Analysis*, V. 94, Issue 5, p. 980-990

### **New variation of the generalized discrepancy principle with due account taken of round-off errors for solving multidimensional ill-posed problems**

*D. V. Lukyanenko*

One of the most efficient way of solving multidimensional ill-posed problems is using of parallel computing that helps us to process a huge amount of data [1]. But the round-off errors that grow with increasing amount of computations can significantly affect the final result of calculations. In this work an approach that is able to take into account these errors and to construct sufficiently stable approximate solution of an ill-posed problem is discussed. Several recent results will be presented on the study of the main issue of this work.

The project has been partially supported by RFBR, project No\_14-01-31201, and by the Supercomputing Center of Lomonosov Moscow State University [2].

## References

1. Lukyanenko D.V., Yagola A.G., Evdokimova N.A. Application of inversion methods in solving illposed problems for magnetic parameter identification of steel hull vessel // J. Inverse and Ill-Posed Problems, Vol.18, No.9, 1013-1029, 2011.
2. Sadovnichy V., Tikhonravov A., Voevodin V.I., Opanasenko V. "Lomonosov": Supercomputing at Moscow State University. In Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale (Chapman & Hall/CRC Computational Science), pp.283-307, Boca Raton, USA, CRC Press, 2013.

### **Численное решение задачи двумерной тензорной томографии методом приближенного обращения**

*С. В. Мальцева, А. П. Полякова, И. Е. Светов*

В единичном круге распределено векторное или симметричное 2-тензорное поле. Требуется восстановить это поле по известным значениям лучевых преобразований (среда без рефракции). Для численного решения поставленных задач предлагается использовать алгоритм, основанный на методе приближенного обращения хорошо себя зарекомендовавшем при решении задач скалярной томографии [1].

*Идея метода.* Приближенное решение операторного уравнения строится путем скалярного произведения исходных данных задачи и усредняющих функций, которые могут быть найдены до получения томографических данных. В случаях, когда найти точные выражения для вычисления усредняющих функций оказывается проблематично, их значения могут быть найдены приближенно с использованием сингулярного разложения оператора.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-31491-мол\_а).

## Список литературы

1. Derevtsov E.Yu., Dietz R., Louis A.K., Schuster T. Influence of refraction to the accuracy of a solution for the 2D-emission tomography problem // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2000. V. 8, Iss. 2. P. 161-191.

### **Direct and inverse problems of nonlinear 3D-magnetoelasticity**

*V. I. Priimenko, M. P. Vishnevskii*

We study the propagation of elastic and electromagnetic waves in elastic conductive 3D-media governed by the Lamé and Maxwell equations coupled through nonlinear magnetoelastic effect. We prove the existence and uniqueness results both for the direct problem and inverse one, which consists in identifying the unknown scalar function  $f(t)$  in the elastic force  $f(t)g(x,t)$  acting on an elastic conductive body when some additional measurement is available.

### **Об одной задаче определения донной поверхности по данным гидролокатора бокового обзора**

*И. В. Прохоров, А. А. Сущенко*

Рассматривается задача картографирования морского дна с использованием гидролокаторов бокового обзора установленных на борту автономного необитаемого подводного аппарата. Как правило, в задачах картографии предполагается, что дно плоское, а искомым является коэффициент донного рассеяния, характеризующий степень неоднородности дна океана [1, 2]. В докладе дан теоретический анализ не менее интересной и с математической точки зрения более сложной задачи, в которой требуется определить рельеф морского дна при заданном коэффициенте отражения дна. Особенность исследования состоит в том, что мы рассматриваем случай, когда эффекты объемного рассеяния оказывают существенное влияние на процесс зондирования во флукутирующей среде. Наиболее адекватное математическое описание этого физического процесса возможно с привлечением кинетической модели, базирующейся на нестационарном интегро-дифференциальном уравнении переноса с соответствующими начальными и граничными условиями [1]. В рамках кинетической модели формулируется и исследуется обратная задача, заключающаяся в определении

функции, описывающей небольшое отклонение уровня дна от горизонтальной плоскости. В приближении однократного рассеяния и некоторых ограничениях на диаграмму направленности приемной антенны для определения искомой функции получена явная формула, справедливая в точках некоторого семейства кривых в горизонтальной плоскости. Обсуждаются особенности практической реализации полученной формулы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-11-00079).

Список литературы

1. Прохоров И.В., Сущенко А.А., Исследование задачи акустического зондирования морского дна методами теории переноса // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 3. С. 400-408.
2. Prokhorov I.V., Sushchenko A.A., Imaging Based on Signal from Side-Scan Sonar // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 756. P. 678-682.

### **Опыт решения и постановки обратных задач конструкционной прочности и живучести**

*А. Н. Рогалев, С. В. Доронин, Е. В. Рейзмунт*

Постановки задач прочности, живучести, безопасности силовых конструкций технических объектов сильно связаны с механикой деформируемого твердого тела, но далеко не сводятся только к ней. Это объясняется: 1) ограниченностью исходной информации и неопределенностью целей при постановке задач; 2) необходимостью привлекать знания из совершенно различных областей; 3) крайне сжатыми сроками всего цикла – от постановки задачи до представления результатов. При исследовании аварийных ситуаций силовых конструкций технических объектов решаются взаимосвязанные задачи: исследование особенностей напряженного состояния конструкций в нештатных ситуациях и при различных вариантах развития аварии, разработка структурных моделей силовых конструкций, позволяющих установить закономерности разрушения силовых конструкций, моделирование причинно-следственных связей, приводящих к последовательным разрушениям. Таким образом, накоплен опыт решения комплекса задач, имеющих все черты обратных задач (нарушается причинно-следственная связь): исследование напряженного состояния поврежденного бака наполнения пресса, исследование напряженного состояния резервуара с дефектами формы и многие другие. На основе опыта их решения в докладе исследуется параметрическая идентификация модели: структурная и параметрическая, применяются конечно-элементные расчеты. Приводятся результаты решений практических задач.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-08-31555 мол\_а).

Список литературы

1. Доронин С.В. Формализация сценариев развития и оценка риска аварийных ситуаций несущих конструкций. // Безопасность труда в промышленности. 2005. №3. С. 54-57.

### **Итерационный метод нахождения нестационарного коэффициента диффузии почвенной влаги**

*Б. Рысбайулы, А. А. Адамов, Ж. Карашибаева*

В почве происходит непрерывный перенос водного раствора связанный с непостоянством условий на ее границе. Этот процесс обычно характеризует несоблюдение условий термодинамического равновесия в почве в вертикальном направлении. В гидрофизике почв применяется уравнение влагопроводности, предложенное Childs E.C., Collis – George N. Данное уравнение передвижения влаги базируются на предположении о том, что вода является ньютоновской жидкостью. Существует еще одна группа явлений, не укладывающихся в рамки выше изложенной теории почвенной влаги. Сущность этих явлений, изучали Дмитриев С.И., Нечаев В.К., Hallaire V. M. При этом поток влаги способен идти из зон с меньшей влажностью через более увлажненную почву к более сухой поверхности испарения.

Для объяснения подобных явлений Hallaire V. M. предложил рассмотреть уравнение движения влаги в виде уравнение третьего порядка. Используя это уравнения стали прогнозировать водный режим почвы и грунтов. Чтобы прогнозировать водный режим почвы и грунта, необходимо располагать входными параметрами уравнения влагопроводности. Основным параметром процесса переноса влаги является коэффициент диффузий.

На неустойчивость процесса измерения коэффициента диффузий обращает внимание Рейнольдс, Глобус А.М. и Лыков А.В. Гарднер используя экспериментальные данные установил некоторые зависимости между коэффициентом диффузий и влажностью. Однако удобная для применения на практике методика расчета этих параметров коэффициента диффузий еще не разработана. Поэтому в настоящей работе разрабатываются приближенные методы расчета коэффициента диффузий почвенной влаги. Градиентные методы для определения коэффициента параболических уравнений исследовано Kabanikhin S.I. [1]. Некоторые обратные задачи для одномерного уравнения переноса тепла изучается в работах [2, 3].

Список литературы

1. S. I. Kabanikhin, *Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications*. De Gruyter, Germany, 2011, 459 p.
2. A. Hasanov, Identification of spacewise and time dependent source terms in 1D heat conduction equation from temperature measurement at a final time *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 2069–2080 p.
3. B. Rysbaiuly, A. Baimankulov, Development and justification of the method of calculation the capillary diffusion of the soil. *Wulfenia Journal, Austria, Mar 2014, Volume 21, Issue 3, 483-500 pp*.

### **Численный анализ обратных экстремальных задач для нестационарной модели переноса вещества**

*О. В. Соболева*

Рассматривается нестационарная модель переноса вещества в ограниченной области. Сформулирована обратная экстремальная задача идентификации неизвестных коэффициентов входящих в нелинейное параболическое дифференциальное уравнение диффузии-реакции при условии Дирихле на границе. Для решения поставленной экстремальной задачи развит и запрограммирован на компьютере численный алгоритм, основанный на методе сопряженных градиентов [1]. Проанализированы результаты вычислительных экспериментов, показавших эффективность используемого численного алгоритма и программного комплекса численного решения коэффициентной обратной экстремальной задачи для модели массопереноса.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00313-а).

Список литературы

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. БИНОМ, Москва, 2003.

### **О решении граничной обратной задачи для нелинейного уравнения**

*Е. В. Табаринцева*

В настоящей работе рассматривается обратная граничная задача для нелинейного параболического уравнения. Приближенное решение строится методом квазиобращения и методом вспомогательных граничных условий. Получены точные по порядку оценки погрешности построенного приближенного решения на одном из классов корректности обратной граничной задачи. Получена двусторонняя оценка модуля непрерывности для нелинейной обратной задачи. Доказана оптимальность по порядку рассмотренных методов квазиобращения с выбором параметра регуляризации по схеме М.М.Лаврентьева на рассмотренном классе корректности. Рассматривается вопрос о квазиоптимальном выборе параметра регуляризации в случае, если априорная информация о точном решении недоступна.

## Список литературы

1. Танана В.П. Об оптимальном по порядку методе решения одной обратной задачи для параболического уравнения // Докл. РАН, 2006, т.407, №3, с.316-318.
2. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. М: Янус-К, 2009.

**Об одном подходе к проблем оценки погрешности в точке при решении обратных задач**

*В. П. Танана*

В отличие от корректных задач оценки погрешности в некорректных задачах производится в классах корректности. То есть в классе корректности выбирается самый "плохой" элемент, погрешности в котором максимальна. Затем оценивается эта погрешность.

В реальных задачах точное решение одно и поэтому оценка погрешности может быть значительно меньше, чем на классе.

Предлагается один подход к решению данного вопроса.

**Обоснование регуляризирующего алгоритма для решения интегральных уравнений первого рода и его приложение**

*В. П. Танана, Е. Ю. Вишняков, А. И. Сидикова*

В данной работе к интегральному уравнению Фредгольма первого рода применяется конечномерная аппроксимация, которая позволяет при использовании вариационного метода регуляризации А.Н. Тихонова с выбором параметра регуляризации из принципа невязки свести задачу к системе линейных алгебраических уравнений.

Для учета погрешности приближенного решения используется модуль непрерывности обратного оператора, учитывающего погрешность дискретизации интегрального уравнения [1].

Получена оценка точности приближенного решения. Данный метод проиллюстрирован на примере решения обратной граничной задачи для уравнения теплопроводности.

## Список литературы

1. Танана В.П., Сидикова А.И. Об оценке погрешности регуляризирующего алгоритма, основанного на обобщенном принципе невязки, при решении интегральных уравнений // Журн. вычисл. методы и программирование. 2015. Т. 16, № 1. С. 1-9.

**3D-инверсия с восстановлением границ аномальных по поляризуемости объектов**

*О. С. Трубачева, М. Г. Персова*

В работе рассматривается метод решения задачи восстановления границ и параметров поляризации аномальных по поляризуемости трехмерных структур. Параметры среды восстанавливаются в трехмерной области под профилем съемки, по измеренному на дневной поверхности полю вызванной поляризации (ВП). Положение границ искоемых аномальных структур и значения параметров поляризации в исследуемой области определяются путем минимизации суммы квадратов отклонений измеренных значений поля ВП от рассчитанных теоретически. Для расчета теоретических значений поля ВП на дневной поверхности используется метод, предложенный в работе [1] и используемый в дальнейшем в работе [2]. На примере синтетических данных, полученных с помощью конечноэлементного моделирования трехмерного поля ВП, подтверждена работоспособность представленного метода.

## Список литературы

1. Моисеев В.С., Рояк М.Э., Соловейчик Ю.Г. Математическое моделирование процессов вызванной поляризации в сложных средах для токовой линии с заземленными электродами // Сибирский журнал индустриальной математики. – 1999. – Т. II. - №1. – С. 19-94.



2. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М., Токарева М.Г. Методы и алгоритмы восстановления трехмерной структуры проводимости и поляризуемости среды по данным электромагнитных зондирований на основе конечноэлементного 3D-моделирования. //Физика Земли, — 2013. —№3, — С. 30-45.

### **Изучение индикатрисы рассеяния на основе продолжения волнового поля в обратном времени**

*В. М. Филатова, Г. Н. Ерохин, Л. Н. Пестов*

В работе изучается поведение индикатрисы рассеяния на основе продолжения волнового поля в обратном времени. Для заданной модели акустической среды численно решается прямая задача для многих источников ("прямое" волновое поле). Полученное синтетическое волновое поле на дневной поверхности (либо реальные данные) продолжается в обратном времени для той же скоростной модели ("обратное" волновое поле). В каждой точке среды изучается связь этих полей и строятся индикатриса рассеяния, а также изображения других параметров. Приводятся результаты обработки синтетических (модель "Marmousi") и реальных данных (Средний Назым, Западная Сибирь).

### **Are low time frequencies in seismic data really needed to reconstruct macrovelocity?**

*V. Tcheverda, G. Chavent, K. Gadylshin*

Unfortunately we have to admit that after decades of development there are still no reliable techniques of full waveform inversion which guarantee reliable reconstruction of both macrovelocity model and reflectors reconstruction for reasonable acquisitions and frequency ranges. As reasonable we mean realistic offsets (about one-two depths of target objects) and temporal frequency above 5 – 7 Hz. The paper is devoted to the so-called Migration Based Travel Times (MBTT) formulation of the data misfit functional. This approach relies on the decomposition of a velocity model onto two subspaces – smooth propagator and rough depth reflectors. On this base the modified data misfit functional is introduced and compared with standard least squares formulation.

Numerical Singular Value Decomposition proves that these two formulations produce functionals which have almost orthogonal stable subspaces. As is well known the classical formulation leads to stable subspaces mainly made of fast oscillating functions (reflectors). At the same time we prove that MBTT modification ensures appearance of the propagator in these stable subspaces.

Numerical experiments prove the feasibility of full inversion for reflected waves in this modified reformulation for the well known Gullfaks velocity model.

### **Nonscattering acoustic objects in the medium with a spherical stratification**

*Yu. A. Chirkunov*

The diffraction of sound waves on a local inhomogeneity in an inhomogeneous anisotropic medium with a special spherical stratification is studied in the model of acoustics. With a help of methods of group analysis is obtained the fundamental solution of the basic differential equation. The fundamental solution as a function of the square of the wave number has poles of first order. It is showed that the sound vibrations with these wave numbers are the proper oscillations of the external medium. With a help of intertwining operators for the differential operator of the basic equation are investigated the the proper oscillations of the external medium. Diffraction problem is researched, provided that in the external medium occur acoustic oscillations with the wave numbers which do not coincide with the wave numbers of proper oscillations of the external medium. In an inhomogeneous medium with a spherical stratification was obtained the existence in this medium of local inhomogeneities (domains) which do not scatter produced by external compactly distributed sources field falling on these inhomogeneities. It means that these inhomogeneities cannot be detected by using the acoustic field which is generated by external compactly distributed sources. The basic characteristics of these nonscattering patterns are presented.

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (2014/138, project number 435); the Programme of Support of Leading Scientific Schools (NSH-2133.2014.1).

## **Обратные задачи восстановления атмосферных характеристик Земли и Марса на основе спектральных данных высокого разрешения**

*Д. В. Чурбанов*

Гетеродинная спектроскопия зародилась в середине прошлого века, до сих пор не утратила своей актуальность и продолжает активно развиваться. В последнее время разрешающая способность самых современных приборов стала достигать значений менее  $10^{-5}$ , что позволило полностью разрешать отдельные линии в солнечном спектре. В основе обработки получаемых спектров лежит модель переноса излучения [1], в которой используются параметры из спектроскопической база данных HITRAN 2012, и атмосферные параметры из базы данных NOAA – GFS.

В работе проделаны расчет по восстановлению концентраций различных газов на основе измеренных данных для Земли и на основе модельных данных Марса. Вместе с этим высокое разрешение при применении методов регуляризации [2] дало возможность определить скорость ветра по доплеровскому сдвигу. Полученные значения концентраций и профили ветра согласуются с наблюдаемыми данными.

Список литературы

1. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической *атмосферной оптики*. Учебно-методическое пособие. Санкт Петербург. 2007 г.
2. Wang Y., Jagola A.G., Yang Ch. Computational methods for applied inverse problems. Walter de Gruyter. 2012.

## **Новые методы регуляризации задач продолжения физических полей с части границы**

*М. А. Шишленин*

В работе представлены новые методы регуляризации задачи продолжения решений с части границы для эллиптических, параболических и гиперболических уравнений, учитывающие априорную информацию об искомом решении [1-3]. Для методов минимизации целевого функционала получено правило остановки итерационного процесса. Приведены результаты численных расчетов и проведен сравнительный анализ численных методов решения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-09230), Министерства образования и науки Российской Федерации и гранта МОН РК 1760/ГФ4, проекта НТП 04.03.02 "Создание методических основ геолого-геофизических исследований очаговых зон ПЯВ в магматических породах".

Список литературы

1. Kabanikhin S. I. Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications. De Gruyter, Germany, 2011.
2. S.I. Kabanikhin, Y.S. Gasimov, D.B. Nurseitov, M.A. Shishlenin, B.B. Sholpanbaev, S. Kasenov. Regularization of the continuation problem for elliptic equations // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2013. Vol. 21, No. 6. P. 871–884.
3. S.I. Kabanikhin, D.B. Nurseitov, M.A. Shishlenin, B.B. Sholpanbaev. Inverse problems for the ground penetrating radar // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2013. Vol. 21, No. 6. P. 885–892.

## **Численное моделирование GPR-зондирования и обратные задачи**

*Б. Б. Шолпанбаев, С. И. Кабанихин, М. А. Шишленин*

В работе приведены результаты использования современных георадаров для обнаружения локализованных объектов. Для исследования применен современный сверхмощный георадар "Лоза-В". Георадар – это прибор, который излучает антенной-передатчиком электромагнитный сигнал в исследуемую среду и принимает отраженные от различных слоев сигналы приемной антенной. В качестве излучающего сигнала используется дельта-образный источник. Проблемы обработки полученных данных георадара состоят в фильтрации сигналов от различных шумов и интерпретации полученных результатов.

Математически принцип работы георадара приближается двумерным уравнением для горизонтальной компоненты напряженности электрического поля  $E_z$  [1]. Для решения некорректной задачи

продолжения сформулируем его как обратную некорректную задачу по отношению к некоторой прямой корректной задаче. Применен оптимизационный метод минимизации целевого функционала, выписан градиент функционала и разработан алгоритм решения обратной задачи. Решив обратную задачу и продолжив поле в сторону неоднородностей, можно определить их количество. В работе показаны результаты для двух и трех неоднородностей в исследуемой среде [2]. Данные численных расчетов модельной задачи качественно совпадают с георадарными данными.

Для математического обоснования результатов интерпретации данных георадара, рассмотрена двумерная задача для компонент напряженности электрического и магнитного поля. Получены численные результаты, аналогичные полученным данным георадара. Разработана методика интерпретации радарограмм и рекомендации для обработки данных георадара.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК №1746/ГФ4 “Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач естествознания”.

Список литературы

1. В.Г.Романов, С.И.Кабанихин. Обратные задачи геоэлектрики. М.: Наука, 1991. - 303с.
2. Кабанихин С.И., Нурсейтов Д.Б., Шолпанбаев Б.Б. Задача продолжения электромагнитного поля в сторону залегания неоднородностей // Сибирские электронные математические известия. [Electron. resource]. <http://semr.math.nsc.ru/v11/c1-171.pdf>. – 2014. – Том 11(2014). – С. 85-102.

### **Многомерные некорректные задачи**

*А. Г. Ягола*

В докладе будут рассмотрены примеры решения некорректно поставленных многомерных обратных задач обработки изображений в астрономии, компьютерной томографии, электронной микроскопии, восстановления распределения магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 14-01-00182\_a, 14-01-91151-ГФЕН\_a.

### **Регуляризирующие алгоритмы обработки изображений и их применение**

*А. Г. Ягола*

В докладе будут рассмотрены некорректно поставленные задачи, возникающие при обработке изображений, и регуляризирующие алгоритмы их решения:

- 1) Обработка астрономических изображений на примере "Креста Эйнштейна".
- 2) Обработка изображений в цифровой фотографии (устранение дефокусировки и смазывания).
- 3) Построение магнитного изображения корабля.
- 4) Подавление кольцевых артефактов в компьютерной томографии.
- 5) Неразрушающий контроль методом отраженных электронов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00182 и 14-01-91151-ГФЕН).

Список литературы

1. E. Koptelova, E. Shimanovskaya, B. Artamonov, M. Sazhin, A. Yagola, V. Bruevich, O. Burkhonov. Image reconstruction technique and optical monitoring of the QSO 2237+0305 from Maidanak Observatory in 2002-2003. – Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 2005, v. 356, pp. 323-330.
2. А.Г.Ягола, Н.А.Кошев. Восстановление смазанных и дефокусированных цветных изображений. – Вычислительные методы и программирование, т. 9, 2008, с. 207-212.
3. Д.В.Лукьяненко, А.Г.Ягола. Использование многопроцессорных систем для решения обратных задач, сводящихся к интегральным уравнениям Фредгольма 1-го рода. - Труды Института математики и механики УрО РАН. 2012, т. 18, № 1, с. 222-234.
4. S. Titarenko, Philip J. Withers. A. Yagola. An analytic formula for ring artefact suppression in X-ray tomography. – Applied Mathematics Letters, v. 23, № 12, 2010, pp. 1489-1495.
5. Н.А.Кошев, Ф.А.Лукьянов, Э.И.Пау, Р.А.Сеннов, А.Г.Ягола. Повышение пространственного разрешения в режиме отраженных электронов в сканирующей электронной микроскопии. - Известия РАН, серия физическая, 2011, т.75, №9, с. 1248-1251.

## **Секция 8. ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

### **Numerical study of alkaline-surfactant-polymer flooding using the chemical compositional reservoir simulator**

*A. C. Berdyshev, B. E. Bekbauov, A. T. Rakhymova*

In this paper we studied the improved mathematical formulation for chemical compositional reservoir simulator UTCHEM and the comparative results of ASP flooding model with our developed mathematical formulations.

In this work we introduce a new approach to model the reduction in pore volume due to adsorption that satisfies the continuity equation. In certain situations, such as significant change in the effective pore size, these enhancements are essential to properly model the physical phenomena occurring in petroleum reservoirs. In addition, this new approach for modeling the adsorption effect on the transport of a component makes it possible to develop a new mathematical formulation for the sequential chemical compositional reservoir simulation.

The innovation is the development of a new mathematical formulation of the mass conservation and pressure equations for the sequential chemical compositional simulation. We have noticed that the net loss of components by fluids is not equal to gain of the same components by fluid phase. Using this model we simulated ASP flooding for two mathematical formulations and compared simulation results.

The mathematical formulation developed in the scope of this work is extended from the UTCHEM model formulation [1, 2] for use in chemical flooding studies. A comparison with the currently used UTCHEM simulator has also been performed. Comparative studies show that the results obtained from IMPEC implementation of the newly proposed formulation are in a good agreement with that of UTCHEM simulator. In the scope of this research work, through its application to the numerical experiment and comparisons with UTCHEM model results, the newly developed formulation has proven to be applicable and accurate.

The project has been partially supported by grant of Ministry of Science and Education of the Republic of Kazakhstan through the Research Project No. 0128 GF4.

#### References

1. Z. Chen, Y. Ma, and G. Chen (2007). A sequential numerical chemical compositional simulator. *Transport in Porous Media* 68, 389-411.
2. Delshad, M., Pope, G.A., Sepehrmoori, K.: UTCHEM Version-9.0, Technical Documentation, Center for Petroleum and Geosystems Engineering. The University of Texas at Austin, Texas, July 2000.

### **Научный информационный интернет-ресурс "Активная сейсмология"**

*Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский*

В работе представлена архитектура и основные сервисы, предоставляемые пользователям интернет-ресурса "Активная сейсмология". Интернет-ресурс предназначен для комплексного информационного обеспечения теоретических и экспериментальных исследований в новом направлении геофизики, в котором при изучении строения земной коры и исследования геодинамических процессов в зонах землетрясений и вулканов используются управляемые источники сейсмических волн.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-07-00832 и 15-07-06821).

#### Список литературы

1. Брагинская Л.П., Григорюк А.П. Информационная система для комплексной поддержки научных исследований в области активной сейсмологии //Вестник КемГУ. 2012 -4: - С. 43-48.

2. Л.П. Брагинская, А.П. Григорюк, В.В. Ковалевский. Научная информационная система "Активная сейсмология" для комплексных геофизических исследований // Вестник КРАУНЦ, Науки о земле, 2015, № 1, Выпуск № 25, - С. 94-98.

### **Оценка датчиков мониторинга электронной почты с помощью синтетического теста TransMail**

*К. И. Будников, А. В. Курочкин, А. А. Лубков, А. В. Яковлев*

По количеству транзакций электронная почта занимает одно из центральных мест в мире среди средств электронных коммуникаций. Для выполнения ряда задач, связанных с учетом, сбором статистики, противодействием распространению спама, кибербезопасностью применяется мониторинг почтового трафика. Непосредственно мониторинг почтовых сообщений выполняет датчик мониторинга электронной почты, который представляет собой программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий разбор входного сетевого трафика, выделение и анализ почтовых сессий в соответствии с заданными критериями и алгоритмами, передачу результатов анализа на следующие уровни системы мониторинга. В работе предложен синтетический тест TransMail, предназначенный для экспериментальной оценки датчиков мониторинга электронной почты. Характеристики испытываемого прибора определяются по результатам обработки им входного трафика. С целью определения статистических параметров тестового трафика исследовались реальные потоки почтовых данных, циркулирующих в сети Интернет. Рассмотрены три варианта подключения датчика к линии связи и предложены три типа формирования соответствующей тестовой нагрузки.

Список литературы

1. Будников К.И., Клисторин И.Ф., Курочкин А.В., Лылов С.А. Датчик удаленного мониторинга электронной почты // Датчики и системы, 2008, №9. сс. 35 – 37.
2. Будников К.И., Клисторин И.Ф., Курочкин А.В. Исследование многопоточной модели линейного интеллектуального датчика мониторинга электронной почты на платформе Win32. // Автометрия, 2010, №10, сс. 124 – 131.

### **The controller multithreading optimization fuzzy approximation**

*I. V. Gorbunov, K. S. Sarin*

Fuzzy approximation could be implemented as parallel computation form. Each approximation fuzzy rule could be computed independently from others [1].

Fuzzy approximates built by machine learning algorithms. Time for build each fuzzy approximate by these algorithms is considerable. Parallel versions of optimization algorithms exist or are being developed. The simultaneous execution a group of parallel version algorithms is required consider mutual influence their calculation on the performance all computation process.

In the paper proposed structure of controller multithreaded optimization based on the original rules and way of automatic generation of these rules. The conditional part of the rules manager specified manufacturer, processor family architecture x86 (x86-64) and type of optimization.

The project has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the base part of state order TUSUR 2015 (project № 3657).

References

1. Nojima Y., Mihara S., Ishibuchi H. Parallel Distributed Implementation of Genetics-Based Machine Learning for Fuzzy Classifier Design // Simulated Evolution and Learning. 2010. V. 6457. P. 309-318.

### **Пространственно-временная фильтрация сигналов при виброрейсмическом зондировании**

*А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский*

В данной работе предлагается высокоэффективный алгоритм обработки виброрейсмических сигналов на основе пространственно-временной фильтрации. Эффективность достигается сочетанием методов регулируемого направленного приема и веерной фильтрации. Приведены примеры



выделения основных сейсмических фаз на расстояниях до 500 км по данным вибросейсмических исследований литосферы Байкальской рифтовой зоны [1].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 11-05-92215-Монг\_а, 14-07-00832-а).

Список литературы

1. Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П. Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. // Отечественная геология, 2013, №3, С.16-23

2. Ковалевский В.В., Григорюк А.П. Повышение эффективности направленного приема сигналов при вибросейсмическом мониторинге // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2014, Т.4, №1, С.211-214

### **Recursive ray tracing to render light interference of scenes including isotropic transparent objects**

*V. A. Debelov*

The problem of visualization of interference phenomena in the calculation of photorealistic images is considered. The presentation material is based on computer modeling of the known physical experiments: Young's experiment (separation of the wave front) and two-beam interference (amplitude division). Material is illustrated enough and explained on the basis of the calculated images. For the first time all the necessary formulas [1, 2] for calculations are gathered in one place, i.e. a mathematical model is suggested. It is shown also, how visual quality of images and calculation cost depend on possible simplifications of the model. This model is the next step of evolution of the local model of light interaction with transparent crystalline media [3] towards the visualization of interference. A possible modification of the inverse recursive ray tracing algorithm [4] is suggested to account for interference while rendering photorealistic images of scenes including isotropic transparent objects.

References

1. Born M., and Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light // Cambridge Univ. Press, 1980.

2. Matveev A.N. Optics // Moscow: Vysshaya shkola, 1985. (in Russian).

3. Debelov V.A., Kozlov D.S. A Local Model of Light Interaction with Transparent Crystalline Media // IEEE Transactions on visualization and computer graphics. – Vol. 19, No. 8. – 2013. – P. 1274-1287.

4. Whitted T. An Improved Illumination Model for Shaded Display // Comm. ACM. 1980. Vol. 23, no. 6. P. 343-349.

### **Компьютерное зрение в задаче анализа коррозионных эффектов на поверхности металлов**

*М. Р. Еникеев, И. М. Губайдуллин*

Современное развитие химической промышленности, разработка новых технологических процессов, протекающих в агрессивных средах, предъявляют высокие требования к конструкционным материалам. Наиболее важными конструкционными материалами являются металлы и их сплавы. В процессе эксплуатации изделий, вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с окружающей средой происходит коррозия [1].

Для решения задачи поиска и оценки коррозионного растрескивания под напряжением был разработан специальный модуль, написанный на языке C++ в Qt SDK, обрабатывающий входные данные, предоставленные пользователем.

Оценка коррозионного растрескивания под напряжением состояло в анализе входных данных в виде изображений трубной стали X70 в различных растворах. В качестве критерия оценки трещины на образце стали использовалась фрактальная размерность. Цель работы: поиск взаимосвязи между структурными изменениями трещины и с химическим и механическим воздействием на неё.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-03-31509 мол\_а).

## Список литературы

1. Мальцева Г. Н. Под редакцией д. т. н., профессора С. Н. Виноградова. Коррозия и защита оборудования от коррозии: Учеб. пособие. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та. 2000.

**Математическое моделирование в задаче построения схемы химических превращений реакции гибели изомерных форм 4-N,N-диметиламинофенилнитрозооксида**

*Л. В. Еникеева, Н. Ф. Мурзашева*

При фотолизе ароматических азидов в аэробной среде взаимодействие триплетных нитренов с молекулярным кислородом приводит к образованию лабильных частиц –нитрозооксидов [1].

Поскольку связь N-O в нитрозооксидном фрагменте имеет полуторный порядок, нитрозооксиды образуются в виде цис- и транс-изомеров.

Авторами проводится изучение кинетических закономерностей гибели изомерных форм 4-N,N-диметиламинофенилнитрозооксида, для которого методом импульсного фотолиза при температурах, близких комнатной, в растворах получены электронные спектры [2].

До недавнего времени не было ясности в вопросе о механизме гибели нитрозооксидов.

На данный момент нами проводится исследование вопроса о механизме химических превращений реакции гибели изомерных форм 4-N,N-диметиламинофенилнитрозооксида. Для установления механизма реакции предлагается построение кинетической модели предполагаемой схемы реакции с последующим исключением стадий с наименьшими значениями констант скоростей стадий. Кинетическая модель строится путем решения обратной и прямой кинетических задач.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (15-07-01764).

## Список литературы

1. Gritsan, N.P. Russ. Chem. Rev. 2007, 76, 1139-1160.

2. Chainikova, E. M.; Khursan, S. L.; Safiullin, R. L. Kinet. Catal. 2006, 47, 549–554.

**Моделирование энергетических ресурсных систем в задачах оптимизации сети сбора и переработки биомассы**

*А. Г. Квашинин, С. Н. Астраков, С. Ю. Вильчек*

Альтернативная энергетика на углеродосодержащих отходах, включая биомассу, практически не развивается из-за высокой стоимости энергии и энергоносителей, производимых из биомассы. Высокая стоимость возникает из-за больших удельных капиталовложений в оборудование и высоких эксплуатационных затрат. Дополнительные трудности вызваны сезонностью образования отходов, большим разнообразием их источников, удаленностью источников отходов от центров их переработки и необходимостью транспортировки энергоносителей до центров потребления энергии.

Одним из способов повышения конкурентоспособности альтернативной энергетике на основе биомассы является построение технологически и экономически эффективных распределенных сетей сбора, транспортировки, переработки биомассы и использования ее энергии. Одним из методов построения таких распределенных систем может стать метод моделирования динамических ресурсных систем с помощью графов [1, 2]. В данной работе предложены методы построения оптимальной сети сбора энергетического ресурса при помощи моделей взвешенных графов. Источник ресурса характеризуются объемом воспроизводства и своим местоположением. Составлена вычислительная программа для выбора оптимального положения базовых станций переработки сырья и построения соответствующей транспортной сети.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-07-00139\_а) и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (код проекта p11528).

## Список литературы

1. Астраков С.Н., Ерзин А.И. Одна модель саморегулирующейся системы // Математические структуры и моделирование. 2004. № 13. С. 30-38.
2. Astrakov S., Tahonov I. A Dynamic Model of Group Interactions // International Journal of Biomedical Soft Computing and Human Sciences. 2011. V. 18, iss. 1. P. 77-84.

**Модели и алгоритмы автоматизации системы сейсмометрического мониторинга технического состояния плотин ГЭС**

*Д. Б. Короленко, Е. П. Золотухин, А. П. Кузьменко, В. С. Сабуров*

Одними из контролируемых параметров, отражающих техническое состояние строительной конструкции в целом, являются динамические характеристики – параметры, характеризующие динамические свойства объекта и проявляющиеся при изменяющихся во времени нагрузках (частоты и формы собственных колебаний, статистические, диссипативные характеристики и др.). Кроме того, значения динамических характеристик позволяют оценить упругие характеристики конструкции и его основания (жесткость, модуль упругости и др.) с помощью математических моделей, по которым можно судить об изменении несущей способности.

В настоящей работе рассмотрена система сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС, позволяющей совмещать задачи регистрации сейсмических событий и мониторинга технического состояния. Основное внимание уделено функциональным моделям и алгоритмам, позволяющим автоматизировать процесс мониторинга технического состояния плотин ГЭС по динамическим и упругим характеристикам сооружения с учетом факторов внешних воздействий. Данная система была внедрена на плотине Красноярской ГЭС. В работе также представлены результаты разработки программного обеспечения и функционирования системы.

**Нейросетевой алгоритм диагностики отказов в распределенных вычислительных системах**

*К. Е. Крамаренко, О. В. Молдованова*

В работе исследуется применимость алгоритма, основанного на нейронных сетях, выполняющего самодиагностику распределенных вычислительных систем. Рассматривается распределенная вычислительная система, состоящая из  $N$  элементарных машин (в дальнейшем – узлов), соединенных каналами связи. Каждый узел может находиться в исправном или неисправном состоянии. Пары узлов назначаются на выполнение задачи. Сравнение полученных результатов ее решения дает информацию о состоянии узлов. Если результаты совпадают, оба узла исправны, иначе один или оба узла являются неисправными. Множество всех результатов сравнения называется синдромом. Для определения состояния узлов системы необходимо дешифровать синдром. В этих целях в работе используются искусственные нейронные сети. На вход нейронной сети подается диагностический синдром, а на выходе получаются множества исправных и неисправных узлов. Диагностический алгоритм был реализован и исследован в интерактивной среде моделирования MATLAB.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант МД-2620.2014.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-07-00048-а, 15-07-00653-а).

## Список литературы

1. Хорошевский В.Г. Архитектура вычислительных систем: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 520 с.
2. Duarte Jr., E. P., Ziwich, R. P., Albin, L. C. P. A survey of comparison-based system-level diagnosis // ACM Comput. Surv. 43, 3, Article 22, 2011. – 56 p.
3. Elhadeif M., Nayak A. Comparison-based system-level fault diagnosis: a neural network approach // IEEE Transactions on parallel and distributed systems, Vol. 23, No. 6, June 2012. – P. 1047-1059.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

### **Обоснование параметров регистрации и обработки данных автоматизированных систем контроля плотин ГЭС**

*А. П. Кузьменко, В. С. Сабуров, Е. П. Золотухин, Н. Г. Кузьмин*

Рассмотрены общие принципы осуществления мониторинга плотин ГЭС с учетом особенностей функционирования разных подсистем контроля: сейсмометрической, геодезической и НДС плотины.

Проведен анализ существующих режимов опроса подсистем и методов обработки данных. На основе теории математической статистики предложены рекомендации по оценке достоверности, достаточности, представительности и точности натуральных данных. Показана необходимость создания потока данных с различных подсистем контроля с единой частотой опроса, что позволит при обработке данных использовать методы математической статистики и теории вероятности, корреляционного и спектрального анализа.

### **Алгоритмы оптимизации ложных конфликтов в параллельных программах на базе транзакционной памяти**

*И. И. Кулагин, М. Г. Курносов*

Альтернативой использования классических методов синхронизации ветвей параллельных программ (мьютексы, семафоры и пр.) является использование программной транзакционной памяти (software transactional memory – STM) [1]. Одной из остро стоящих проблем является разработка эффективных алгоритмов обнаружения конфликтов при выполнении транзакций в параллельных STM-программах – обнаружения конкурентной модификации потоками объектов в памяти.

Широко используемые алгоритмы обнаружения конфликтов на основе машинного слова [1] (GCC TM, TinySTM, DSTM) не исключают возникновение ложных конфликтов – ситуации, при которой конфликт выполнения транзакций происходит на уровне метаданных runtime-библиотеки STM, а не на уровне объектов параллельной программы. В работе предлагаются алгоритмы сокращения числа ложных конфликтов по результатам предварительного профилирования программы (profile guided optimization). Алгоритмы исследованы на тестовых программах из пакета STAMP.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-07-00653, 15-07-02693).

Список литературы

1. P. Felber, T. Riegel, C. Fetzer. Dynamic Performance Tuning of Word-Based Software Transactional Memory. 13th ACM PPoPP, Feb. 2008.

### **Спектральная декомпозиция и геометрический анализ пространственных данных и изображений**

*М. А. Курако, Ан. Г. Марчук, К. В. Симонов*

Работа посвящена новому направлению в обработке данных космического геомониторинга (дистанционного зондирования Земли), которое может быть использовано при диагностике сложных природных объектов и систем – "геометрический" анализ визуальных данных, где совместно выполняется вейвлет-преобразование данных для круглых структур и шиарлет-преобразование для линейных структур.

Задаче разделения изображения на морфологически разные составляющие в последнее время уделяют много внимания в связи с её значимостью для различных актуальных приложений в науках о Земле. Разрабатываемая вычислительная технология для эффективного решения этой задачи может быть применена к широкому кругу геообъектов, включая исследования, связанные с проявлениями природных катастроф. Например, данная методика может помочь в обнаружении древних импактных структур.

**Распределенная система управления солнечным вакуумным телескопом**

*А. А. Лубков, С. В. Власов, В. Н. Котов, А. С. Максимов, Ю. А. Попов*

Рассмотрены архитектурные особенности распределенной системы автоматизации солнечного вакуумного телескопа. На основе контроллеров SoC (система на кристалле), интеллектуальных приводов и IP видеокамер автоматизированы процессы наблюдения и регистрации данных, включая: автоматическое наведение телескопа в заданную точку Солнца, гидирование заданной области Солнца, сбор данных об измеренных параметрах. Также автоматизированы технологические процессы, обеспечивающие работоспособность подсистем телескопа: вакуумирования, термокомпенсации верхнего иллиминатора вакуумной трубы, разгрузки зеркала сидеростата.

Список литературы

1. Степанов В.Е., Банин В.Г., Круглов В.И. и др. Экспериментальный макет Большого солнечного вакуумного телескопа (ЭМ БСВТ) СиБИЗМИР // Новая техника в астрономии. Л.: Наука, 1979. С. 42–51.

2. Ковадло П. Г., Лубков А. А., Бевзов А.Н., Будников К. И., Власов С. В., Зотов А. А., Колобов Д. Ю., Котов В.Н., Перебейнос С. В., Русских И. В. Проект автоматизированной системы управления БСВТ // Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения чл.- корр. РАН В.Е. Степанова. (г. Иркутск, Россия, 16-21 сентября 2013), С. 260 - 263.

**Распределенные информационно-управляющие системы для опасных производств**

*А. С. Мамаев, О. З. Гусев, В. В. Колодей, С. Р. Шакиров*

Современные крупные производства характеризуются пространственным распределением, сложностью в обеспечении надежных информационных связей и высокими требованиями к скорости реакции на возникающие события, что вынуждает применять автоматизированные системы с распределенным управлением. В таких системах часть автоматических управляющих воздействий реализуется программно-техническими средствами, установленными в непосредственной близости от объекта управления. Опасные производства накладывают дополнительные требования на программно-аппаратные средства с точки зрения безотказности и устойчивости к внешним воздействиям различной природы.

В работе представлены результаты разработки программно-аппаратного комплекса для построения распределенных информационно-управляющих систем для опасных производств. Отличительными особенностями данного комплекса являются: открытая модульная архитектура, универсальность технических средств и искробезопасное исполнение. На этой базе возможно построение как простых локальных автоматизированных систем, так и масштабных распределенных систем диспетчерского управления сложным производством.

**Размещение стоков в беспроводных сенсорных сетях**

*Д. А. Мигов*

Рассматривается задача оптимального размещения стоков (sink nodes) в беспроводных сенсорных сетях (wireless sensor networks). Предлагается подход к размещению стоков, оптимальный с точки зрения минимального времени доставки сообщений от сенсоров до ближайших стоков. Также предлагается метод размещения стоков в сети, позволяющий минимизировать энергозатраты при передаче сообщений от сенсоров к стокам. Данные задачи сформулированы как задачи размещения Р-медиан и Р-центров в графе, соответствующем структуре беспроводной сенсорной сети. Также предлагается способ размещения стоков, позволяющий максимально повысить структурную надежность беспроводной сенсорной сети.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-07-00769, 14-07-31069).



### **Параллельные алгоритмы эволюционного синтеза больших циркулянтных сетей с реализацией на суперЭВМ**

*О. Г. Монахов, Э. А. Монахова*

В работе рассматривается задача построения больших циркулянтных сетей, т.е. циркулянтных сетей (графов, структур) имеющих наибольшее число вершин при заданных степени вершин и диаметре. Данная задача является вариантом известной классической задачи – "Degree/diameter problem". Для решения поставленной задачи предложен параллельный алгоритм эволюционного синтеза таких циркулянтных сетей. Проведены вычислительные эксперименты на суперкомпьютерных центрах НГУ и ССКЦ, получены новые циркулянтные сети, улучшающие в 25 случаях из 63 для разных степеней и диаметров наибольшие сети, известные в настоящее время по зарубежным источникам.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-01-00031).

### **Модификации бионических алгоритмов в применении к задачам на ориентированных графах**

*К. А. Нечунаева*

Для многих задач комплексных систем (сложных информационных, телекоммуникационных, вычислительных, транспортных и прочих сетей) часто моделью сети выступает оргграф [1], [2]. Он не только показывает структуру сети, но и отображает связи между её узлами, учитывая пропускную способность дуг и рёбер.

Не все сетевые задачи можно решить точными методами, так как при реальных условиях появляются ограничения, накладываемые на структуру, длину путей, стоимость сети, и задача может стать NP-трудной. Одним из популярных инструментов решения таких задач являются эвристические методы, в нашем случае бионические алгоритмы: генетический алгоритм [1], алгоритм клонирования [3]. Эти алгоритмы имеют схожие элементы: кодирование особей/антител, некоторые мутации.

Для настройки этих алгоритмов используются такие параметры как размер популяции, вероятность мутации, процент отсева худших особей, пригодность особи. Мы будем оценивать количество мутаций, чтобы, отталкиваясь от этих показателей, можно было настроить алгоритмы под конкретные задачи. В случае оргграфов основные операторы и кодирование будут изменены.

Список литературы

1. Edwin S. H., Hou Ninvan Ansari and Hong Ren: "A genetic algorithm for multiprocessor scheduling", IEEE Transactions On Parallel And Distributed Systems, Vol. 5, No. 2(1994), pp. 113-120.
2. Dai, Y.S., and Poh, K.L.: "Solving the Network Interdiction Problem with Genetic Algorithms", In Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management Systems, 2002, Taiwan.
3. Ulutas, B.H., Islier, A.A.: "Parameter Setting for Clonal Selection Algorithm in Facility Layout Problems", In Proc. of the ICCSA-2007, LNCS 4705, Part I, pp. 886-899.

### **Метод моментов случайных величин и анализ функционирования масштабируемых распределенных вычислительных систем**

*К. В. Павский, В. А. Павский*

При анализе эффективности функционирования многомашинных вычислительных систем (ВС), как сосредоточенных, так и распределенных, используются показатели надежности [1]. Процесс функционирования ВС обычно рассматривается как специальный класс динамических систем или систем потоков случайных событий. Математическая формализация таких систем осуществляется системами дифференциальных уравнений для случайных функций (моментные вероятности состояний). Решение систем дифференциальных уравнений, даже для установившегося режима, удается получить редко. С другой стороны, учитывая современный уровень развития ВС и суперкомпьютеров, число вычислительных узлов в которых сотни тысяч, как раз и требуется рассмотрение,

в качестве базовых, моменты различных порядков и других интегральных числовых характеристик. Это означает, что желательно уметь составлять системы дифференциальных уравнений непосредственно, например, для моментов случайных величин произвольного порядка. В работе предлагается метод составления систем дифференциальных уравнений и их аналитическое решение. Приводится расчет показателей живучести и надежности распределенных ВС.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-07-00160, 15-37-20113).

Список литературы

1. Хорошевский В.Г. Архитектура вычислительных систем. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. – 520 с.

### **Планирование решения масштабируемых задач на ресурсах распределенных вычислительных систем**

*Е. Н. Перышкова, А. В. Ефимов, С. Н. Мамойленко*

Обзор существующих систем управления ресурсами (СУР) вычислительных систем (ВС) показывает, что большинство из них не учитывает свойства масштабируемости задач. Данное свойство позволяет решать задачи пользователей на подсистемах ВС с разным количеством вычислительных ресурсов. Свойством масштабируемости обладают до 98 % задач [1], решаемых на высокопроизводительных ВС.

В данной работе предложена модификация СУР PBS TORQUE и планировщика MAUI, реализующая алгоритмы и политики при обслуживании масштабируемых задач. Проведено исследование показателей процесса планирования при решении потоков масштабируемых задач.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МД-2620-2014.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-07-00048, 13-07-00160).

Список литературы

1. Lifka D. The ANL/IBM SP scheduling system // Job Scheduling Strategies for Parallel Proc. LNCS. Springer-Verlag, 1995. Vol. 949. P. 295–303.

### **Моделирование работы информационно-управляющей системы установки по утилизации органических отходов**

*А. В. Писарев, С. Ю. Вильчек, А. Г. Квашинин, С. Р. Шакиров*

В работе представлены результаты моделирования одного из режимов работы информационно-управляющей системы установки по утилизации органических отходов. Установка производит тепловую энергию и энергоносители из органических отходов, включая биомассу. В качестве топлива для работы установки могут быть использованы органические отходы с различными химическими составом и физическими свойствами. Технологическая схема установки позволяет перерабатывать высоковлажные виды топлива с относительной влажностью до 75 % (куриный помет, подстилочная масса и пр.).

Основным элементом установки является термохимический реактор [1]. В нем могут быть реализованы различные термохимические процессы: сушки, пиролиза, газификации, полного сжигания отходов.

Информационно-управляющая система позволяет осуществлять управление во всех режимах работы установки. Это достигается как за счет конструктивных решений, так и за счет применения алгоритмов оптимального, адаптивного управления с использованием математических моделей процессов в контурах регулирования.

В работе представлены результаты моделирования работы информационно-управляющей системы при работе оборудования установки в режиме сушки высоковлажного топлива в термохимическом реакторе с последующим сжиганием его в дожигающем устройстве.

## Список литературы

1. Вильчек С.Ю., Гаркуша В.В., Квашнин А.Г., Мишнев А.С., Сторожев Ф.Н., Яковлев В.В. Компоненты автоматизированной системы управления процессами переработки биомассы в тепло и энергоносители во вращающемся термохимическом ректоре // Вычислительные технологии, 2013. С. 139-143.

**Картирование свойств геологических объектов в сложных модельных условиях**

*А. Г. Плавник, А. Н. Сидоров*

В работе рассматривается постановка и приводятся примеры решения задачи картирования свойств геологических объектов с учетом анизотропии на основе моделирования деформационного преобразования в рамках вариационного метода геокартирования. Задача сводится к модификации модельных условий, представленных дифференциальными уравнениями в частных производных, соответствующей преобразованию координат для моделируемой деформации.

Реализация подхода осуществляется в программном комплексе GST, который благодаря общности возможностей по заданию модельных условий позволяет реализовать его в полной мере. В рамках единого проекта выполняются необходимые промежуточные построения.

Подход с преобразованием модельных условий при решении задачи картирования, легко обобщается на случай трехмерных задач. Этим снимаются значительные трудности постановки и решения содержательных задач трехмерного моделирования, в которых неоднородность и анизотропия отложений, как правило, является неотъемлемым и важнейшим внешним фактором, определяющих закономерности пространственного изменения свойств геологических объектов.

**Новый непараметрический статистический тест в задаче обнаружения полыней по данным дистанционного зондирования**

*Г. И. Салов, В. П. Пяткин*

Предлагается новая непараметрическая статистика и тест, основанный на проверке гипотезы об однородности трех выборок [1,2]. Тест Уитни эквивалентен специальному (линейному) случаю этого теста. Некоторые сравнения сделаны для случая с экспоненциальными выборками. Тест может быть использован при мониторинге ледяного покрова Арктики в задаче обнаружения полыней по данным дистанционного зондирования. Одно из актуальных приложений – прокладывание трассы Северного морского пути в период навигации по данным космической съемки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-07-00068).

## Список литературы

1. Салов Г.И. О мощности одного нового статистического критерия и двухвыборочного критерия Вилкоксона // Автометрия. 2014. – Т. 50, № 1. С. 44-59.

2. Салов Г.И. Новый непараметрический статистический критерий для задач с тремя выборками, частный случай которого эквивалентен критерию Уитни // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2014. – Т. 17, № 4. – С. 389-397.

**Применение языка программирования Форт для построения распределенных информационно-управляющих систем**

*Д. О. Смолин, В. В. Колодей, А. С. Мамаев, С. Р. Шакиров*

Под распределенной системой подразумевается различное количество программируемых цифровых узлов, связанных между собой информационными каналами. Предложено использовать в каждом узле виртуальную машину, обладающую свойствами Форт-ядра – диалоговым режимом работы и возможностью модификации алгоритмов работы в реальном времени. Целью работы является получение удобного инструментария для создания распределенного программного обеспечения. Удобство заключается в простоте модификации программ любого узла в работающей системе, сканирования – определения топологии узлов, расширения состава системы, диагностики работы любого узла. Реализованные расширения Форт-ядра позволяют оперировать с элементами системы как

с объектами. Полученный инструментарий предназначен для моделирования, развертывания, настройки, диагностики и сопровождения программного обеспечения распределенных систем на протяжении всего периода эксплуатации. Акцент делается на построение распределенных децентрализованных систем, имеется возможность переноса целевых алгоритмов между узлами. Компактность кода Форт-ядра позволяет использовать широкий ряд аппаратных платформ в качестве узлов системы. На данный момент разработаны Форт-ядра для контроллеров семейств AVR, ARM7, CORTEX.

### **Применение графов атак для оценки защищенности компьютерных систем**

*О. Д. Соколова*

Для анализа устойчивости работы сети часто требуется исследовать ее уязвимость, т. е. найти такие "узкие" места, последовательное использование которых может привести к нарушению функционирования сети. Для решения таких задач используются различные подходы, одним из которых является построение для исходной сети так называемого графа атак [1]. Граф атак для сети с заданной топологией – это ориентированный граф, представляющий всевозможные последовательности действий, в результате которых нарушается нормальное функционирование сети. Такие последовательности действий называются трассами атак. В случае распознавания ситуации как опасной необходимо пресечение трассы атак (изменение пропускной способности канала, установка защитных экранов и др.). В докладе рассматривается задача исследования информационной сети с целью выявления ее "узких" мест – моделируется работа сети при воздействии на нее различных атак (например, отказ в обслуживании). Описывается алгоритм, позволяющий находить трассы, приводящие к опасным состояниям. Из множества элементов найденных трасс выбирается критическое множество дуг, удаление которых приводит к невозможности достижения опасных состояний. Таким образом, формируется множество действий, необходимых для повышения уровня защищенности сети.

Список литературы

1. Steven Noel, Sushil Jajodia, Lingyu Wang, Anoop Singhal. Measuring Security Risk of Networks Using Attack Graphs // International Journal of Next-Generation Computing, Vol. 1, No. 1, July 2010.

### **Смешанный метод описательной статистики и построение гистограммы**

*Г. А. Сулейманова*

В работе описывается смешанный метод, позволяющий решать как задачи описательной статистики, так и построение гистограммы. При этом он имеет ряд преимуществ по сравнению с классическими методами. Так, например, разбивка на интервалы произвольная в соответствии со спецификой исходных данных, тогда как в классическом методе stemplot разбивка на интервалы должна быть кратная 10.

В отличие от классического метода построения гистограммы, в предлагаемом смешанном методе исходные данные не теряют своих значений при распределении их по интервалам. Тогда как в классическом методе построения гистограммы при распределении данных в таблицу частот данные теряют свои значения. Благодаря этим преимуществам, смешанный метод позволяет при решении обобщенной задачи описательной статистики и построения гистограммы снизить объем вычислений вдвое по сравнению с классическими методами.

Список литературы

1. Johnson B.R. and Onwuegbuzie, A.J.(2004), Mixed Methods Research: A Research Paradigm Whose Time Has Come. Educational Researcher, Vol. 33, No. 7 pp. 14-26, Published by: American Educational Research Association

2. Onwuegbuzie, A.J. and Leech, N.L. (2006) Linking Research Questions to Mixed Methods Data Analysis, The Qualitative Report, 11 (3)ss. 474-498, <http://www.nova.edu/ssss/QR/QR11-3/onwuegbuzie.pdf>, 22.12.2014

3. Trochim, William M. K. (2006). Descriptive statistics // Research Methods Knowledge Base. Retrieved 14 March 2011.

4. Кыдыралиев С.К., Урмамбетов Б.М. (2006) Сборник заданий по современной статистике. Бишкек, АУЦА, 181.

5. Rubenstein, R.N. vb (1992) Functions, Statistics, and Trigonometry The University of Chicago School Mathematics Project (Teachers Edition) by Foresman Scott, Illinois, 844.

6. Thomas R.(1997) Quantitative Methods for Business Studies. Published by Financial Times/ Prentice Hall. ISBN 10: 0132311194 Malyshkin V., Perepelkin V. Optimization methods of parallel execution of numerical programs in the LuNA fragmented programming system // The Journal of Supercomputing. 2012. V. 61, iss. 1. P. 235-248.

### **Отображение нейронных сетей обработки информации на распределенные вычислительные системы с регулярной структурой**

*М. С. Тарков*

Огромное количество глобальных межнейронных соединений (синапсов) усложняет реализацию нейронных сетей в виде СБИС, что приводит к необходимости распределенной обработки информации множеством взаимодействующих процессоров. В данной работе предложены эффективные методы отображения нейронных сетей обработки данных на распределенные вычислительные системы. Клеточные нейронные сети эффективно отображаются на графы вычислительных систем (параллельных программ) типа "решетка" или "линейка". Анализ функционирования нейронных сетей с глобальными взаимодействиями (многослойные персептроны, сети Хопфилда, сети Кохонена) и алгоритмов их обучения показывает, что их отображение на распределенные вычислительные системы приводит к межпроцессорным взаимодействиям, связанным с выполнением полугрупповых операций (операций редукции) над массивами. Трансляционно-циклический обмен данными ("каждый с каждым") между процессорами является частным случаем такой операции. В работе показано, как реализовать эффективное выполнение этих операций на гиперкубе и торе, используя схему "бабочка" и отображение этой схемы на гиперкуб с последующим вложением гиперкуба в тор. Рассмотрено использование предложенных алгоритмов реализации полугрупповых операций при отображении слоя нейронов и многослойных персептронов на распределенную ВС с топологией гиперкуба и тора.

### **Импортозамещение в области разработки аппаратно-программных комплексов как базис для создания высоконадежных АСУ ТП**

*Г. П. Чейдо., С. К. Голушко., Б. Н. Пищик, С. Р. Шакиров*

Ни одно современное производство не обходится без автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), требования к надежности которых постоянно растут. Среди факторов риска наряду с ростом функциональности все больший вес приобретают кибервоздействия, как случайные, так и намеренные. Намеренные воздействия могут быть двух типов: чисто внешние, проникающие в систему по используемым каналам связи, и внутренние, через "закладки" в программно-аппаратных компонентах.

Методов борьбы с внешними кибервоздействиями достаточно много и они общеизвестны. Данная работа сфокусирована на решении второй части проблемы, связанной с так называемыми "закладками" – вредоносными компонентами программного кода и техническими средствами, скрытыми от конечного пользователя, но позволяющими злоумышленнику активировать процесс вмешательства в работу АСУ ТП. Последствия такого вмешательства могут быть самыми разрушительными, а в роли злоумышленника может оказаться не только физическое лицо, но и специально созданная структура недружественного государства.

В этих обстоятельствах единственным способом создания высоконадежных и устойчивых АСУ ТП является применение отечественных аппаратно-программных средств. В КТИ ВТ СО РАН созданы и находятся в промышленной эксплуатации десятки АСУ ТП, построенных на отечественных компонентах, в том числе собственной разработки, многолетний опыт эксплуатации которых подтверждает правильность выбранного вектора на импортозамещение.

### **Оптические информационные технологии для промышленных и научных применений**

*Ю. В. Чугуй*

Решение многих актуальных задач в науке, в атомной, космической, оптико-механической, нефтеперерабатывающей и других отраслях, а также на железнодорожном транспорте требует разра-



ботки и создания принципиально новых бесконтактных оптических измерительных систем, оптических информационных и лазерных технологий с высоким разрешением (от 1 мкм до 0.1 мкм) и быстродействием (от  $10^2$  до  $10^5$  измер./с). В последние годы в КТИ НП разработаны и созданы десятки информационных измерительных систем и технологий различного назначения [1], которые внедрены на ведущих предприятиях базовых отраслей страны и используются в институтах Сибирского отделения РАН. Приводятся технические характеристики созданных приборов и систем, а также результаты их испытаний на промышленных предприятиях и в институтах СО РАН.

Список литературы

1. Chugui Yu.V., Latyshev A.V., Makarov S.N., Plotnikov S.V., Senchenko E.S., Sysoev E.V., Verkhogliad A.G., Zav'yalov P.S. 3D optical measuring technologies for scientific and industrial applications // Proc. 10<sup>th</sup> IMEKO Symposium Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry (LMPMI-2011), Braunschweig, 12-13 Sept., 2011. VDI-Berichte. Dusseldorf, 2011. N. 2156. P. 13-22.

### **Информационно-аналитические системы для задач регионального управления на основе картографических веб-сервисов**

*О. Э. Якубайлик*

Практика использования геоинформационных веб-систем в информационном обеспечении задач регионального управления в настоящее время становятся все более распространенной. Они обеспечивают возможности доступа к размещенным и распределенным в сети Интернет громадным массивам геопространственной информации, сервисы удаленной обработки данных на высокопроизводительных компьютерах; они изначально являются многопользовательскими.

В настоящей работе представлен обзор сторонних и оригинальных технологий и веб-сервисов, которые использовались при создании и внедрении региональных геоинформационных веб-систем. Разработанные программно-технологические решения успешно зарекомендовали себя как основа ресурсоемких информационно-аналитических систем регионального уровня для задач различной тематики – информационной поддержки отраслевого управления (в сфере здравоохранения, образования, транспорта), экологического мониторинга и оценки состояния окружающей природной среды, прогноза социально-экономического развития региона, централизованного информационного обеспечения картографическими данными. Заказчиками этих систем являются органы исполнительной власти.

## Секция 9. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### Применение методов оптимального управления в задачах проектирования композитных конструкций

*Е. В. Амелина, С. К. Голушко, А. Ю. Горнов, Т. С. Зароднюк*

Рассматривается задача минимизации веса композитных конструкций при наличии различных технологических, структурных и физико-механических ограничений [1]. Данная проблема является задачей условной оптимизации, включающей как прямые ограничения на управления, так и траекторные ограничения.

Предложен подход к решению поставленной задачи, заключающийся в поиске оптимальных решений в классе рациональных проектов. Поставленная задача численно решается с помощью метода "последовательной безусловной оптимизации", заключающегося в формировании свертки терминальных функционалов и многократном решении однокритериальной задачи с использованием различных методов оптимизации, конструктивно учитывающих прямые ограничения на управление [2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-37-20265 мол\_a\_вед).

Список литературы

1. Голушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008.
2. Горнов А.Ю. Вычислительные технологии решения задач оптимального управления. Новосибирск: Наука. 2009.

### Численное моделирование динамики коллапсирующих вихревых нитей в сверхтекучем гелии

*В. А. Андрющенко, Л. П. Кондаурова, С. К. Немировский*

Данная работа посвящена численному моделированию динамики вихревых нитей перед перезамыканием [1]. Моделирование производилось в рамках метода вихревой нити с использованием уравнения Био-Савара. Установлено, что зависимость минимального расстояния между точками вихревых нитей от времени существенно зависит от начального расположения нитей и температуры. Однако, при непосредственном сближении нитей эта зависимость принимает универсальный вид, а ближайшие участки вихревых нитей образуют пирамидальную структуру. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [2].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: 13-08-00673, 15-02-05366.

Список литературы

1. S.K. Nemirovskii. Quantum turbulence: Theoretical and numerical problems // Phys. Rep. 2013. V.524. P.85-202.
2. M.S. Paoletti, M.E. Fisher, D.P. Lathrop. Reconnection dynamics for quantized vortices // Phys.D.: Non.Phen. 2010. V.239. P.1367-1377.

### Интегральная модель долгосрочного прогнозирования возрастной структуры основных видов электростанций

*А. С. Апарцин, Е. В. Маркова, И. В. Сидлер, В. В. Труфанов*

Применению интегральных моделей типа В.М. Глушкова для исследования долгосрочных стратегий развития электроэнергетической системы России посвящен цикл работ авторов. Одной из наиболее актуальных является проблема старения оборудования электростанций. Постановка специальной задачи оптимального управления (ОУ) сроками вывода из эксплуатации устаревшего оборудования включает в качестве базового уравнение с  $n$  операторами Вольтерра в соответствии с

разбиением элементов системы на возрастные группы. Ядра операторов отражают эффективность функционирования элементов группы, а правой частью является суммарная располагаемая мощность электростанций [1].

В данной работе рассматривается численное решение задачи ОУ для векторного случая с подразделением станций на ГЭС, ТЭС и АЭС при различных сценариях роста располагаемой мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-01425а).

Список литературы

1. Апарцин А.С., Сидлер И.В. Применение неклассических уравнений Вольтерра I рода для моделирования развивающихся систем // Автоматика и телемеханика. 2013. № 6. С. 3-16.

### **Восстановление температурного поля плюма по интерферограммам с помощью полиномов Бернштейна**

*Э. В. Арбузов, В. А. Арбузов, О. С. Мелёхина*

В работе предложен метод восстановления температурного поля плюма по его интерферограмме, основанный на аппроксимации интерференционных полос полиномами Бернштейна. Параметрическое задание интерференционных полос полиномами позволяет визуализировать градиенты температуры, вычислить скорость движения плюма и тепловой поток через границы областей, задаваемых интерференционными полосами. Теория плюмов – конвективных течений разогретого вещества, возникающих на границе ядро-мантия в гравитационном поле Земли, была предложена Т.Дж. Уилсоном [1]. Скорость движения, структура и развитие термогравитационных плавучих струй методами сдвиговой, голографической интерферометрии и гильберт-оптики изучались в работах [2-4].

Количественные характеристики, получаемые в результате обработки экспериментальных данных визуализации процессов термогравитационной конвекции в сильновязкой жидкости, позволяют осуществлять проверку адекватности разрабатываемых математических моделей изучаемых сред и результатов численных экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-08-00818).

Список литературы

1. Wilson, J. T. A Possible Origin of the Hawaiian Islands // Canadian Journal of Physics, 41, 6, 1969. P. 863—870.

2. Kaminski E., Jaupart C. Laminar starting plumes in high-Prandtl-number fluids. // J.Fluid Mech. 2003. 478. P. 287-298.

3. Ганжерли Н.М., Мауреч И.А., Черных Д.Ф. Исследование свободно-конвективной струи методом голографической интерферометрии. // ЖТФ. 2002. 72, вып. 2. С. 42-46.

4. Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Бердников В.С., Буфетов Н.С., Дубнищев Ю.Н., Шлапакова Е.О. Оптическая диагностика структур и эволюции плавучих струй в сильно-вязкой жидкости // Автометрия. 2014. Т. 50, № 5. С. 47-55.

### **Математическое моделирование разработки нефтяных месторождений с применением гидроразрыва пласта**

*И. В. Афанаскин, А. В. Королёв, В. А. Юдин, С. Г. Вольпин*

Разработка нефтяных месторождений России с каждым годом сопровождается ухудшением качества запасов нефти. Начинают эксплуатироваться все более сложные месторождения, отличительными особенностями которых являются: высоковязкие нефти, низкопроницаемые или нетрадиционные коллектора, коллектора с высокой неоднородностью по фильтрационно-емкостным свойствам и т. п. В этих условиях часто применяемый гидроразрыв пласта (ГРП) перестает быть только технологией интенсификации добычи нефти, а становится технологией повышения нефтеотдачи

пласта, и даже неотъемлемой частью технологии разработки месторождения, без которой эксплуатация скважин становится просто нерентабельной. Кроме того, на старых месторождениях количество добывающих скважин при реализации заводнения существенно превосходит количество нагнетательных, а компенсация отбора жидкости закачкой воды близка к 100 %. Следовательно, приемистость нагнетательных скважин намного больше продуктивности добывающих. Но чудес не бывает, такой эффект достигается в результате автогидроразрыва пласта, возникающего при превышении забойного давления в нагнетательных скважинах над давлением разрыва породы при закачке больших объемов воды. Образующиеся в результате этого трещины колоссальны, их длина вполне сопоставима с расстоянием между скважинами.

Ясно, что в этих условиях моделирование разработки нефтяных месторождений с применением ГРП, обычно осуществляемое простым введением отрицательного скин-фактора в формулу для расчета коэффициента продуктивности, не позволяет рассчитать реальное распределение давления и насыщенности в пласте, а главное – не позволяет получить кинжальный прорыв воды по трещине гидроразрыва от нагнетательной скважины к добывающей, и не удовлетворяет требованиям специалистов нефтяной отрасли.

Прямое же моделирование трещин ГРП на расчетной сетке с помощью ее локального измельчения, разумеется, возможно, и дает наилучшую точность расчета, но требует неоправданно высокой квалификации вычислителей, а с ростом количества скважин становится совершенно невозможным, ввиду необходимости использования колоссального количества ячеек модели, а следовательно и огромных вычислительных ресурсов.

В работе анализируется эффективность ряда альтернативных подходов к моделированию разработки нефтяных месторождений с применением ГРП, в частности, использование моделей двойной проницаемости, применение специальных моделей скважины и "несоседних соединений".

### **Математическое моделирование процесса комбинированного заводнения нефтяных месторождений: полимер-ПАВ**

*Д. Ж. Ахмед-Заки, С. Т. Мухамбетжанов, Т. Иманкулов, О. Турар*

Данная работа основана на теории фильтрации в пористой среде [1]. Мировая практика разработки месторождений путем вытеснения нефти из пластов комбинированными методами [2] показала, что их экономические показатели, характеризующие динамику добычи нефти, более высокие, чем в процессе разработки на естественных режимах и или при применении только одного метода повышения конечной нефтеотдачи пластов. В тоже время, задача построения адекватной математической модели, описывающей, совместный учет процессов тепло и массопереноса в анизотропной неоднородной пористой среде при применении "комбинированных" методах воздействия на пласт – закачка ПАВ и полимера (геле-полимера) при различных температурных режимах все еще остается сложной технологической проблемой и данная задача исследована в неполной мере. В статье рассматривается трехмерная математическая модель процессов тепло и массопереноса в анизотропной пористой среде при закачке ПАВ и полимера для различных температурных режимов, а также разработка вычислительного параллельного алгоритма и интерактивной программы с оперативным расчетом на доступных высокопроизводительных ресурсах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РК, по проекту "Разработка распределенной высокопроизводительной информационной системы анализа нефтегазовых месторождений в рамках концепции i-fields".

Список литературы

1. Данаев Н.Т., Корсакова Н.К., Пеньковский В.И. Многофазная фильтрация и электромагнитное зондирование скважин. - Алматы: Эверо, 2014. - 280 с.
2. Najafabadi N.F., Delshad M., Han C., Sepehrnoori K. Formulations for a three-phase, fully implicit, parallel, EOS compositional surfactant-polymer flooding simulator // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – Vol. 86–87. - P. 257–271.

**Топологические методы решения граничных задач***В. А. Бабешко*

Рассматривается применением топологического метода граничная задача о поведении совокупности литосферных плит, находящихся на деформируемой подложке, при изменении их взаимного расположения [1-16]. На примере двух полубесконечных литосферных плит, моделируемых пластинами Кирхгофа, с прямолинейными границами, способных сближаться, выяснены свойства поведения таких блочных структур, которые могут приводить к землетрясениям, ранее не отмеченным отечественными и зарубежными сейсмологами. Описаны свойства таких землетрясений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-96502).

## Список литературы

1. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О блочных элементах в приложениях// Физическая мезомеханика. 2012. Т.15. №1. С. 95-103.
2. Бабешко В.А., Ритцер Д (Канада), Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О локализации энергии природных процессов и природные вирусы ДАН 2013, 448, № 4, С.406-409.
3. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О разнотипных покрытиях с дефектами в статических задачах сейсмологии и наноматериалах. // ДАН. 2014.Т.459. № 6. С. 41-45.
4. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Об одной модели некоторых природных явлений // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2014 №3, . С. 15–23. (ISSN 1729-5459).
5. Reid N.F. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906. Rep. of the State Investigation Commiss. Vol. 2, pt.1. Washington, 1910. 56 p.
6. Голицын Б.Б. Избранные труды. Т. 2. М. Изд-во АН СССР, 1960. 465 с.
7. Gutenberg, B., Richter C. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, 1954.
8. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. М. Изд-во иностр. лит.1963. 670 с
9. Гамбургцев Г.А Перспективный план исследований по проблеме "Изыскание и развитие прогноза землетрясений"// Развитие идей Г.А. Гамбургцева в геофизике. М. Наука, 1982, С.304-311.
10. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 104 с.
11. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
12. Babeshko V.A. Russian National Joint Used Centers for Seismology (Net). EPOS Preparatory Phase Regional Conference, 19 -21 March 2012, Prague. {Electron. resource}. [http://rp7.ffg.at/eu-russian\\_opendays](http://rp7.ffg.at/eu-russian_opendays).
13. Ворович И.И., Бабешко В.А., Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.,1979. 320с.
14. Ворович И.И.,Бабешко В.А., Пряхина О.Д. Динамика массивных тел и резонансные явления в деформируемых средах / М., Наука 1999. 246 с.
15. Гамбургцев Г.А Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 451с.
16. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Об одной факторизационной задаче Гильберта - Винера и методе блочного элемента // ДАН. 2014.Т.459. № 5. С.557-561.

**Топологические методы моделирования литосферных плит***О. М. Бабешко*

Рассматривается статическая граничная задача о взаимодействии литосферных плит, контактирующих на разломе и находящихся на деформируемом основании. Топологическим методом задача сведена к исследованию и решению системы функциональных уравнений Винера–Хопфа, точное решение которых получено лишь в последнее время. В результате исследований, показано, что при определенных условиях на характер взаимодействия торцами литосферных плит между собой, а также на внешние условия, в зоне разлома возникает неограниченная концентрация напряжений [1-16].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-96508).



## Список литературы

1. В.А.Бабешко, О.В.Евдокимова, О.М.Бабешко Топологические методы в теории скрытых дефектов и некоторые аномалии // ДАН. 2014.Т.457. № 6. С.650-655.
2. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. О разнотипных покрытиях с дефектами в статических задачах сейсмологии и наноматериалах. // ДАН. 2014.Т.459. № 6. С. 41-45.
3. Бабешко В.А. Павлова А.В., Ратнер С.В., Вильямс Р.(США) К решению задачи о вибрации упругого тела, содержащего систему внутренних полостей трещин // ДАН. 2002. Т. 382, №5. С. 625-628.
4. Бабешко В.А., Бабешко О.М. Метод факторизации в краевых задачах в неограниченных областях // ДАН. 2003. Т.392. № 6. С. 767-770.
5. Бабешко В.А., Бабешко О.М. Формулы факторизации некоторых мероморфных матриц-функций // ДАН. 2004. Т. 399, №1. С. 163-167.
6. Бабешко В.А., Бабешко О.М.Метод факторизации решения некоторых краевых задач // ДАН. 2003. Т.389. № 2. С.184-188.
7. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Об автоморфизме и псевдодифференциальных уравнениях в методе блочного элемента// ДАН. 2011.Т. 438. № 5. С. 623-625.
8. Бабешко В.А., Бабешко О.М, Евдокимова О.В. К проблеме исследования материалов с покрытиями // ДАН. 2006. Т. 410. №1. С. 49-52.
9. Бабешко В.А., Бабешко О.М, Евдокимова О.В. К проблеме оценки состояния материалов с покрытиями // ДАН. 2006. Т. 409. №4. С.481-485.
10. Бабешко В.А. Белянкова Т.И., Калинин В.В. Метод фиктивного поглощения в задачах теории упругости для неоднородного полупространства // ПММ. 2002,Т. 66. Вып. 2. С. 276-284.
11. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.,1979. 320с.
12. Бабешко В.А. О системах интегральных уравнений динамических контактных задач // Доклады АН СССР. 1975. Т.220. №6. С.1293-1296.
13. Бабешко В.А. Статические и динамические контактные задачи со сцеплением // Прикладная математика и механика. 1975. Т.39. Вып.3. С.505-512.
14. Бабешко В.А. Факторизация одного класса матриц-функций и ее приложения // Доклады АН СССР. 1975. Т.223. №5. С.1094-1097.
15. Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Babeshko O.M. Grishenko D.V. Localization in Mechanics and Nature. Proceedings of the XLI Summer School-Conference "ADVANCED PROBLEMS IN MECHANICS" St. Petersburg, June 30-July 5, 2014, pp. 209-216.
16. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Об одной факторизационной задаче Гильберта - Винера и методе блочного элемента // ДАН. 2014.Т.459. № 5. С.557-561.

**Численное моделирование трехфазных неизотермических потоков в пористой среде с использованием концепции глобального давления**

*Д. Р. Байгереев, Н. М. Темирбеков*

В работе предлагается новая постановка задачи трехфазной неизотермической фильтрации несмешивающихся жидкостей, основанная на введении замены переменных, с помощью которой из уравнений для определения давления и температуры исключены градиенты функций капиллярного давления. Известно [1], что последние неограниченно возрастают, когда насыщенности приближаются к соответствующим остаточным значениям. Для численного решения рассматриваемой задачи построена неявная разностная схема, полученная интегро-интерполяционным методом. Исследованы свойства аппроксимации, устойчивости разностной схемы, доказана теорема о сходимости решения разностной задачи к решению дифференциальной задачи. Адекватность предлагаемой модели проверяется на примере неизотермической задачи вытеснения нефти из пористой среды посредством закачки водяного пара. В работе представлены результаты вычислительных экспериментов с варьированием входных параметров и эмпирических зависимостей, проанализированы особенности решения разностной задачи.

## Список литературы

- Chavent G. A fully equivalent global pressure formulation for three-phase compressible flow. CoRR, Vol. abs/0901.1464, 2009, 19 с.

## **Разработка кинетической модели реакции селективного гидрирования ацетилена на кластере золота**

*Н. М. Байназарова, Д. А. Пичугина*

Одним из распространенных способов получения этилена является каталитическое гидрирование ацетилена [1]. Присутствие ацетилена мешает дальнейшему превращению полиэтилена или этиленгликоля. В настоящий момент нет активного и селективного катализатора очистки этиленовой фракции от примесей ацетилена по реакции гидрирования [2]. Рассматриваются активно показавшие себя катализаторы на основе нанодисперсного золота (Au). Для исследования скоростей отдельных стадий реакции, описывающих поведение всех участников процесса, применяются теоретические исследования (квантово-химические расчеты) и методы формальной кинетики [2]. При этом первоочередным шагом является анализ чувствительности (АЧ) кинетических кривых к константам скорости стадий. АЧ помогает осуществить редукцию системы [3,4,5].

Сконструировано математическое описание процесса протекания реакции гидрирования ацетилен-этиленовой смеси на кластере золота. Исследовано и количественно оценено влияние отдельных констант скоростей химических реакций гидрирования ацетилена на кластере золота; выделены существенные и наименее влиятельные из них методом локального АЧ; проведена редукция схемы, исключены 4 константы, оказывающие наименьшее влияние.

### Список литературы

1. С. А. Николаев, В. В. Смирнов, А. Ю. Васильков, В. Л. Подшибихин. Синергизм каталитического действия наноразмерных золото-никельных катализаторов в реакции селективного гидрирования ацетилена в этилен. Кинетика и катализ. 2010. Т. 51. № 3, с. 1–5.
2. Д. А. Пичугина, С. А. Николаев, Д. Ф. Мухамедзянова, Н. Е. Кузьменко. Квантово-химическое моделирование адсорбции этилена и ацетилена на кластерах золота. Журнал физической химии, 2014. Т. 88. № 6, с. 1–6.
3. Л.С. Полак, М.Я. Гольденберг, А.А. Левицкий. Вычислительные методы в химической кинетике. – М.: Наука, 1984. – 280 с.
4. Л.Ф. Нурисламова, Н.М. Байназарова, И.М. Губайдуллин. Анализ чувствительности кинетических кривых к изменению констант скоростей реакции модели реакции гидроалюминирования олефинов. Журнал СВМО, 2013. Т. 15. №1. С. 34-40.
5. Нурисламова Л.Ф., Губайдуллин И.М. Редукция детальных схем химических превращений окислительных реакций формальдегида и водорода на основании результатов анализа чувствительности математической модели // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2014. Т. 15. № 4. С. 685-696.

## **Стохастическое клеточно-автоматное моделирование пространственной динамики**

*О. Л. Бандман*

В классе асинхронных клеточных автоматов (КА), моделирующих нелинейную пространственную динамику, выделяется подкласс стохастических КА, функционирование которых состоит из случайной последовательности простых действий (применений локальных операторов) в случайно выбираемых клетках дискретного пространства. Рассмотрены поведенческие свойства эволюций стохастических КА: к неподвижному устойчивому состоянию, к устойчивым колебаниям, автоволнам и хаосу, что определяет широкую область их применения. Наибольшее внимание уделяется вычислительным свойствам стохастических КА и их зависимости от модификации режима применения локальных операторов путем введения некоторого порядка их применения, а также введением частичной синхронизации (блочно-синхронный режим). Эти модификации важны для достижения приемлемой эффективности распараллеливания задачи при больших её размерах.. Путем проведения ряда вычислительных экспериментов по параллельной реализации стохастических КА, моделирующих процессы типа "реакция-диффузия" получены оценки эффективности параллельных реализаций стохастических КА на суперкомпьютерах для разных модификаций стохастического режима. При этом отмечено, что блочно-синхронное преобразование приводит часто к суперэффективности из-за сокращения количества обращений к генератору случайных чисел, а также сокращения операции вычисления чисел по модулю (при применении периодических граничных условий.)

### **Моделирование осесимметричных плазменных ловушек методом частиц-в-ячейках**

*Е. А. Берендеев*

Данная работа посвящена разработке численных алгоритмов моделирования плазмы в магнитных ловушках открытого типа цилиндрической геометрии. Особенностью таких ловушек является сложная конфигурация магнитного поля для удержания плазмы внутри, поэтому используемая численная модель должна с высокой точностью воспроизводить движение заряженных частиц в сильных магнитных полях. Автором предложен численный алгоритм, основанный на методе частиц-в-ячейках и методах Монте-Карло, позволяющий описывать поведение плазмы в ловушке-мишени.

На примере созданной в ИЯФ СО РАН ловушке показана высокая эффективность применения разработанного подхода: с помощью численного моделирования удалось получить оценку потерь плазмы из ловушки, а также установить размер и плотность образующегося столба плазмы. Для проведения расчётов использовалась авторская программа PlaTiNum.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31220, 14-01-00392, 15-01-00508), проведение вычислительных экспериментов выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-11-00485).

Список литературы

1. Е.А. Берендеев, Г.И. Димов, А.В. Иванов, Г.Г. Лазарева, М.П. Федорук. Моделирование низкотемпературной многокомпонентной плазмы в ловушке-мишени // Доклады Академии наук. Сер.: Физика. 2015. № 5, вып. 460. Издательство МАИК.

### **Анализ парожидкостного равновесия многокомпонентной углеводородной смеси месторождения на основе информационно-вычислительной системы**

*Е. В. Бирюкова, К. Ф. Коледина*

Данная работа основана на разработанном математическом описании анализа фазового состояния систем природных углеводородов [1]. Реализована информационно-вычислительная система для расчета, включающая в себя определение составов и количественного соотношения паровой и жидкой фаз при заданных давлении, температуре и общем составе смеси. Проведены вычисления для экспериментальных данных из литературы [2].

Список литературы

1. Бирюкова Е.В., Коледина К.Ф. Информационно-вычислительная система анализа парожидкостного равновесия в многокомпонентных углеводородных системах // Сборник трудов Второй Международной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений" - УГАТУ, 2014. – С.170-174

2. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа М.: "Грааль", 2002

### **Применение неотражающих граничных условий при решении спектральных задач теории гидродинамической устойчивости**

*С. П. Борисов, А. Н. Кудрявцев*

При исследовании устойчивости течений в неограниченных областях возникает проблема постановки граничных условий на удаленных границах. Если линейная задача теории устойчивости решается итерационным методом стрельбы, то используются, как правило, граничные условия, полученные путем рассмотрения асимптотического поведения решения вдали от области сдвигового течения. Однако, метод стрельбы, требующий достаточно хорошего начального приближения для нахождения каждого собственного значения задачи устойчивости, во многих случаях, когда такие начальные приближения просто неизвестны, неудобен. Более предпочтительным является использование глобальных методов, сводящих решение задачи устойчивости, после введения той или иной пространственной дискретизации, к алгебраической проблеме собственных значений для некоторой матрицы. Применение упомянутых выше асимптотических граничных условий вместе с глобальными методами затруднительно, поскольку искомое собственное значения почти всегда входит в такие

условия нелинейным образом. Обычно в таких случаях ограничиваются требованием обращения в нуль на удаленных границах возмущений всех гидродинамических величин. Это, однако, приводит к необходимости значительного увеличения расчетной области для получения достаточно точных результатов.

В настоящей работе рассматривается применение в спектральных задачах теории устойчивости приближенных неотражающих граничных условий характеристического типа, получивших достаточно широкое распространение в вычислительной гидродинамике. Подобный подход позволяет получить стандартную алгебраическую задачу на собственные значения, которая может быть решена с помощью одного из хорошо разработанных в вычислительной линейной алгебре методов. Конкретные рассмотренные примеры включают устойчивость сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине, течения вблизи линии растекания на передней кромке крыла, плоской детонационной волны (решения Зельдовича – Неймана – Дёринга). Во всех случаях для аппроксимации пространственных производных используется псевдоспектральный метод, основанный на разложении решения в ряд по полиномам Чебышева. Результаты расчетов с неотражающими граничными условиями сравниваются с данными, полученными с помощью других подходов, анализируется точность и эффективность решения спектральных задач теории гидродинамической устойчивости с помощью данного метода.

Работа поддержана грантом Правительства РФ (Договор № 14.Z50.31.0019) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

### **Схема для решения уравнений Максвелла в случае трехмерных плоских областей**

*М. А. Боронина, В. А. Вшивков*

Работа направлена на исследование неявной схемы для задач физики электромагнитных полей с целью увеличить устойчивость алгоритма. Мотивом создания послужила задача динамики встречных пучков заряженных частиц в современных ускорителях, где требованием к устойчивости метода является условие  $c\tau/h < 1$ , где  $\tau$  – временной шаг,  $h = \min\{h_x, h_y, h_z\}$  – шаги по пространственным переменным,  $c$  – скорость света. Вследствие того, что размеры пучков в разных направлениях отличаются в сотни раз, уменьшение сетки в поперечном направлении ведет не только к увеличению количества действий, связанных с количеством узлов сетки, но и к увеличению количества временных шагов программы. При этом необходимо проводить исследование эффектов при больших размерах области на малых расстояниях от ее центра, то есть брать достаточно много мелких пространственных шагов в поперечном направлении [1]. Использование параллельных алгоритмов с учетом балансировки нагрузки процессоров дает возможность проводить расчеты лишь с небольшим отношением поперечных размеров (1:50) [2].

В докладе представлены результаты исследования новой неявной конечно-разностной схемы, не уступающей по качеству стандартной схеме с перешагиванием и позволяющей проводить расчеты с использованием уравнений Максвелла для областей с различными масштабами по пространству [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31088, 14-01-00392, 14-07-00241).

#### Список литературы

1. Берендеев Е.А., Боронина М.А., Корнеев В.Д. Параллельный алгоритм решения задач динамики заряженных частиц с учетом балансировки вычислительной нагрузки // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2014. №1. С.97-112.
2. M.A. Boronina, V.D. Korneev. The parallel three-dimensional PIC code for the numerical modeling of ultrarelativistic beams // Bull. Nov. Comp. Center, 16, 2013. – P. 15-22.
3. М. А. Боронина, В. А. Вшивков, Г. И. Дудникова. Неявная схема для решения уравнений максвелла в областях с различными масштабами // Доклады Академии наук высшей школы России. - 2014. - № 4 (25). - С. 39-46

### **Сравнительный анализ способов оценки параметров систем**

*И. В. Бычков, В. И. Зоркальцев, И. В. Мокрый*

В докладе планируется изложить результаты исследований способов оценки параметров математических моделей систем на основе фрагментарных, избыточных, противоречивых данных. В качестве одного из приложений исследований рассматривается математическая модель экосистемы озера Байкал.

При идентификации параметров моделей не всегда ясно, каким образом следует соизмерять степень близости наблюдаемых показателей и их расчетных величин в конструируемой модели при определении параметров этих моделей. Для этих целей могут использоваться расстояния между векторами, порождаемые гильбертовскими, октаэдрическими, чебышевскими и др. нормами, в рамках которых возможно использование различных правил выбора весовых коэффициентов, возможна многокритериальная парето-оптимизация и др. подходы. Доказано, что многие постановки задач оценки параметров могут быть сведены к использованию метода наименьших квадратов за счет выбора весовых коэффициентов [1]. Обсуждаются возможные подходы формирования весовых коэффициентов. Излагаются результаты сравнительного анализа различных способов оценки параметров моделей на базе использования метода статистических испытаний.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-07-07412214).

Список литературы

1. Бычков И.В., Зоркальцев В.И., Казазаева А.В. Весовые коэффициенты в методе взвешенных наименьших квадратов. Сиб ЖВМ, 2015, т.18, №3 с.275-288.

### **Light self-focusing in the atmosphere. Simplified description**

*I. A. Vaseva, M. P. Fedoruk, A. M. Rubenchik, S. K. Turitsyn*

The ground based pulsed laser system is a promising way to mitigate the space debris problem [1]. Recently it was demonstrated that for typical parameters of a laser pulse the self-focusing in the atmosphere could degrade the laser beam quality, decrease the laser intensity on the target [2].

The key features of the beam evolution (diffraction and Kerr nonlinearity) can be described using the standard paraxial approximation for the envelope of the electric field - the nonlinear Schrodinger equation. Even with powerful modern computers the complete modeling of the self-focusing requires some effort and in situations when one have a lot of parameters and the optimal regime must be found it is desirable to have a simplified description of the process.

We consider the propagation of the laser beam through the nonlinear layer of the finite thickness. For the considered laser system the collapse point is located beyond this region, where the propagation is linear. In this case, the self-focusing effect can still greatly modify the laser beam but without the catastrophic collapse of all the energy into a small volume.

Here we show that the situation can be accurately modeled within the “thin window” model [3]. We suggest the analytical formula determining the field structure at the exit of a thin non-linear medium. It can be used as an initial condition to compute the subsequent optical field using linear propagation. The numerical calculations confirm the applicability of the used analytical model.

References

1. Phipps C. R., Baker K. L., Libby S. B., Liedahl D. A., Olivier S. A. et al. Removing orbital debris with lasers // *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 49, iss. 9. P. 1283–1300.
2. Rubenchik A.M., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. The effect of self-focusing on laser space-debris cleaning // *Light: Science & Applications*. 2014. Vol. 3, e159.
3. Marburger J. H. Self-focusing: Theory // *Progress in Quantum Electronics*. 1975. Vol. 4. P. 35-110.

### **Математическое моделирование каталитических процессов в химических реакторах**

*Н. В. Верниковская*

Гетерогенные каталитические процессы широко используются как в химической промышленности, так и в решении вопросов защиты окружающей среды. Наряду с традиционными типами ре-



акторов, для которых хорошо развита теория математического моделирования, разрабатываются новые технологические решения, для которых необходимо создавать математические модели. И в том и в другом случае, результирующие дифференциальные уравнения в частных производных (ДУЧП), описывающие процессы переноса, теплопроводности и диффузии, а также каталитические реакции, отличаются сильной нелинейностью, вызванной наличием реакций, и сильной жесткостью, вызванной различием в характерных временах протекания процессов. Это приводит к необходимости построения алгоритмов решения дифференциальных уравнений, способных быстро и качественно проводить большой объем вычислений.

В работе представлен многолетний опыт математического моделирования различных гетерогенных каталитических процессов, реализуемых как в традиционных, так и в нетрадиционных типах реакторов. Рассмотрены различные процессы в реакторах трубчатого типа, с блочным катализатором, с кипящим слоем катализатора, в двухслойном реакторе (платиновые сетки плюс монолитный блок) и т.д. Для решения получающихся систем ДУЧП, как правило, использовался метод прямых для сведения системы ДУЧП к системе ОДУ, интегро-интерполяционный метод для дискретизации уравнений и сочетание метода типа Розенброка с итерационным процессом. Во всех случаях для проверки адекватности математической модели, алгоритма и программы представлено сравнение полученных данных с данными экспериментов.

### **Построение неоднородного массива ячеек для задач клеточно-автоматного моделирования роста и деления клеток бактерий**

*А. А. Витвицкий*

В работе представлен метод организации массива ячеек клеточного автомата, который позволяет моделировать динамику поверхности клеток бактерий различных форм. Основная идея метода заключается в том, что поверхность разбивается на слои ячеек, что позволяет изменять отдельные части структуры моделируемой поверхности, не перестраивая всю поверхность целиком. Кроме того, такая организация ячеек позволила реализовать быстрый алгоритм определения соседства ячеек, также представленный в этой работе. На основе предложенных алгоритмов был реализован программный комплекс и проведены вычислительные эксперименты, которые показали эффективность предложенного подхода в задачах [1,2], где необходимо изучение двусторонней связи между процессами приводящими к динамике поверхности, и, непосредственно, самой динамикой.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-31425 mol\_a).

Список литературы

1. Bonny M., Fischer-Friedrich E., Loose M., et al. Membrane Binding of MinE Allows for a Comprehensive Description of Min-Protein Pattern Formation // PLOS Computational Biology. 2013. Т.9. №12. С.1–12
2. Loose M. Spatial Regulators for Bacterial Cell Division Self-Organize into Surface Waves in Vitro // Science. 2008. Т.320 С.789–792

### **Уравнения упругопластического деформирования пластин со смешанными условиями на их лицевых поверхностях**

*Ю. М. Волчков, Е. Н. Полтавская*

На основе аппроксимации решения плоской задачи отрезками полиномов Лежандра построены уравнения упругопластического деформирования пластин со смешанными условиями на их лицевых поверхностях (на одной части поверхности задаются смещения, на другой части – напряжения). В отличие от классических уравнений теории пластин, порядок построенных дифференциальных уравнений не зависит от типа краевых условий на лицевых поверхностях. Это позволяет корректную формулировку контактных задач и дает возможность построить уравнения слоистых пластин. Процедура построения модифицированных уравнений для изотропных и ортотропных пластин изложена в [1–3].

Для аппроксимации искоемых функций (напряжений и смещений), входящих под знак производной по продольной и поперечной координатам в уравнениях равновесия и соотношениях Коши, используются различные отрезки полиномов Лежандра, что соответствует различной изменчивости напряженно-деформированного состояния по этим координатам. Во внутренних точках пластины используются определяющие соотношения для упругопластического материала. В задачах упруго-пластического деформирования коэффициенты результирующей системы уравнений зависят от текущего напряженного состояния в пластине.

Для решения системы дифференциальных уравнений используется метод интегрирования по параметру нагружения. Для нахождения решения краевой задачи на каждом шаге по параметру нагружения используется метод ортогональной прогонки.

Список литературы

1. Иванов Г. В. Теория оболочек. Н.: НГУ, 1980.
2. Волчков Ю. М., Дергилева Л. А. Сведение трехмерной задачи теории упругости к двумерной на основе аппроксимации напряжений и смещений полиномами Лежандра. ПМТФ. 2007. Т. 48. №3. С. 179-190.
3. Волчков Ю. М. Уравнения цилиндрического изгиба ортотропных пластин с произвольными условиями на их лицевых поверхностях. ПМТФ. 2014. Т. 55. №1. С.84-90.

### **Численная модель формирования разрыва в пузырьковой жидкости при импульсном нагружении**

*В. А. Вишневков, В. К. Кедринский*

Среди многих процессов, связанных с высокоскоростной гидродинамикой многофазных течений, особый интерес вызывают существенно нелинейные процессы в пузырьковых (кавитирующих) средах, развивающиеся при ударно-волновом нагружении, которые приводят к формированию разрывов (отколов) в потоке или к его разрушению в результате неограниченного роста пузырьков, формированию пенных структур и переходу кавитирующей среды в состояние газ-капли. Существующие численные модели, используемые в такого рода высокоскоростных многофазных системах для описания динамики состояния среды, только указывают на появление в процессе решений этих особых проблем, но не решают их. Схема сглаженных частиц (SPH) не позволяет исследовать тонкую структуру двухфазного потока. Использование класса схем, записанных в дивергентной форме с использованием коррекции потоков типа "кабаре", хорошо описывает ударные волны, но сильно размывает контактные разрывы. Для решения задач такого рода предлагается новая схема, основанная на методе частиц-в-ячейках, который широко применяется при решении задач физики плазмы. В данной работе впервые рассматривается принципиально новая численная схема, которая позволяет пройти этап "непрерывного" перехода к развитию разрыва и описанию динамики дальнейшего состояния его "берегов". Данная схема принципиально отличается от схемы частиц в ячейках Харлоу тем, что частицы имеют собственную скорость и поэтому границы с вакуумом не размываются.

### **Гибридное моделирование бесстолкновительных ударных волн**

*Л. В. Вишневкова, Г. И. Дудникова, Т. В. Лисейкина, Е. А. Месяц*

В данной работе представлена двумерная гибридная численная модель формирования и структуры бесстолкновительных ударных волн, генерируемых в галактических остатках сверхновых звезд [1]. При моделировании ударная волна формируется двумя способами: а) при отражении сверхзвукового потока от границы области и взаимодействия между входящим и отражающимся потоками плазмы, в) при взаимодействии потока плазмы с неподвижным фоном. Магнитное поле направлено под произвольным углом к фронту волны. Гибридное приближение [2-4] уменьшает вычислительные затраты по сравнению с использованием полностью кинетической модели и, с другой стороны, позволяет исследовать процессы ускорения частиц во фронте ударной волны. Другим важным преимуществом созданной гибридной модели является возможность изучения плазменных неустойчивостей на ионно-временных масштабах, пренебрегая электронными высокочастотными модами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31304 мол\_а и 14-01-00392 а).

Список литературы

1. M.A. Riquelme and A. Spitkovsky. Magnetic amplification by magnetized cosmic rays in supernova remnant shocks // *Astrophys. J.*, 2010, 717, pp. 1054–1066.
2. Л.В. Вшивкова. Численное моделирование динамики многокомпонентной плазмы // *Вестник Новосибирского государственного университета*, 2003. Т. 3, вып. 2. С. 3-20.
3. L. V. Vshivkova. Numerical simulation of plasma using a hybrid MHD-kinetic model // *Bulletin NCC, Series: Numerical Analysis*, 2009, Issue: 14, pp. 95-114.
4. L. V. Vshivkova, G.I. Dudnikova. Numerical modeling of plasma phenomena using the PIC-method // *Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, 2012 25th International Symposium on, 2012, pp: 398 – 400.

### **Моделирование поведения сплошных сред на основе метода частиц**

*Н. Ф. Габсаликова, Д. В. Бережной*

Для описания макроскопических объектов уже невозможно придерживаться молекулярной концепции, и материальные частицы сплошной среды должны представлять собой элементы более крупного масштабного уровня, а именно размера пор или минеральных зерен материала. В работе используется двухпараметрический потенциал Леннарда Джонса.

Для реализации расчетов на графических ускорителях используется библиотека с открытым исходным кодом VexCL [2]. Данная библиотека упрощает разработку приложений с применением технологии OpenCL и позволяет использовать интуитивную нотацию для записи базовых операций линейной алгебры. Расчеты проводились на гетерогенном вычислительном кластере, содержащем три GPU AMD Radeon HD 7970. На основании реализованного алгоритма был решен ряд модельных задач.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 154102555, 153120602).

Список литературы

1. D. Demidov, K. Ahnert, K. Rupp, and P. Gottschling. Programming CUDA and OpenCL: A case study using modern C++ libraries. *SIAM J. Sci. Comput.*, 35(5):C45–472, 2013.

### **Численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с дисклинациями в нематическом жидком кристалле**

*Р. В. Галев, А. Н. Кудрявцев, С. И. Трашкеев*

Создание нового поколения интегральных волоконно-оптических систем с возможностью динамического управления их свойствами требует существенного улучшения нашего понимания процессов взаимодействия лазерного излучения с нелинейными оптическими средами. Особенно перспективным является применение в таких системах жидких кристаллов (ЖК), типичных представителей т. н. "мягких материалов" (soft matter), т. е. сред, физические свойства которых могут существенно меняться при относительно слабых внешних воздействиях.

В настоящей работе численно моделируется взаимодействие гауссова пучка монохроматического излучения, распространяющегося по оптического волокну, со слоем нематического ЖК, распределение поля директора (преимущественного направления ориентации молекул ЖК) в котором включает линейные особенности (дисклинации). Уравнения Максвелла для анизотропной среды решаются модифицированным методом FDTD, для задания неотражающих условий на границах расчетной области используется метод PML. Расчетный код распараллелен с помощью библиотеки MPI, при проведении расчетов использовалось до 80 процессоров высокопроизводительного вычислительного кластера, общее число узлов расчетной сетки достигало  $2.7 \cdot 10^8$ .

В результате проведенных расчетов получены данные об изменении распределения интенсивности и направленности лазерного излучения, прошедшего через слой ЖК, вычислено, какая часть излучения теряется в результате рассеяния в окружающую внешнюю среду и какая сохраняется вну-

три оптического волокна, исследована зависимость характеристик пучка после взаимодействия с ЖК от толщины слоя ЖК.

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта №129 СО РАН. Два первых автора также были поддержаны при ее выполнении грантом Правительства РФ (Договор № 14.Z50.31.0019 для поддержки исследований под руководством ведущих ученых).

### **Трассировка кривой пересечения поверхностей**

*С. Ю. Гатилов*

В данной работе рассматривается проблема поиска множества точек пересечения двух параметрически заданных поверхностей. Предлагается решение задачи, основанное на численном методе трассировки.

Представлена система уравнений, характеризующая точки пересечения, а также система уравнений для сингулярных точек пересечения. Поиск точек пересечения по стартовым точкам выполняется методом Ньютона – Рафсона с псевдообратной матрицей. Трассировка кривой основывается на методе предиктор-корректор [1], где в качестве предиктора используется метод Рунге – Кутты или Адамса – Башфорта для решения ОДУ, а в качестве корректора – метод Ньютона. Форсирование ранга матрицы Якоби делает численные методы устойчивыми при трассировке сингулярной кривой. Шаг трассировки выбирается адаптивно, каждый элемент сохраняется в виде кубической кривой Безье. В целом кривая пересечения образует непрерывно дифференцируемый кубический сплайн.

Чтобы исключить кратное нахождение одного и того же пересечения, каждое пересечение окружается запрещённой зоной в 3D-пространстве. Точное замыкание контура пересечения, точное попадание ветви в точку ветвления, и точное завершение трассировки на границе обеспечиваются механизмом якорных точек.

Список литературы

1. Allgower E. L., Georg K. Introduction to Numerical Continuation Methods // Classics in Applied Mathematics 45. SIAM, 2003.

### **Моделирование тепловых волн эндотермической реакции в слое катализатора с нагревом микроволновым излучением**

*А. П. Герасев*

Современный уровень разработки математических моделей химических реакторов позволяет проводить предсказательное моделирование новых явлений. Анализ результатов теоретических исследований стимулировал поиски условий существования тепловых волн эндотермической химической реакции, протекающей за счет внешнего источника энергии.

Данная работа посвящена поиску условий существования и численному исследованию ранее неизвестного явления распространения тепловых волн (автоволн) эндотермической химической реакции в неподвижном слое катализатора, возникающих при нагреве системы микроволновым излучением [1, 2].

Список литературы

1. Герасев А.П. Моделирование каталитических процессов в неподвижном слое с применением микроволнового излучения для осуществления эндотермической реакции // Кинетика и катализ. 2011. Т. 52, № 6. С. 931-937.

2. Герасев А.П. Моделирование тепловых волн эндотермической реакции в слое катализатора с нагревом микроволновым излучением // Журнал физической химии. 2013. Т. 87, № 8. С. 1305–1310.

### **Математические модели притока газа к скважине для фильтрации, подчиняющейся обобщенному закону Форхгеймера**

*С. А. Гоголева, В. А. Толпаев*

Для описания фильтрационных течений предлагается применять новый закон фильтрации, названный авторами обобщенным законом Форхгеймера. В новом законе наряду с проницаемостью,

пористостью, извилистостью микроканалов применяются и другие материальные константы пористой среды, а известные [1] законы Дарси, Краснопольского – Шези, Смрекера, Мищевича, степенной закон фильтрации вытекают из него как частные случаи. Обобщенный закон Форхгеймера позволяет заменить явное описание структуры коллектора (которую трудно установить геофизическими методами) её косвенным учетом посредством введенных в него различных "поправочных" коэффициентов и подбором последних так, чтобы удовлетворить имеющимся данным о работе скважин.

Приводятся математические модели для обработки и интерпретации данных газогидродинамических исследований газодобывающих скважин, фильтрация к которым описывается обобщенным законом Форхгеймера и метод определения максимально возможного энергосберегающего значения дебита.

Список литературы

1. Басниев К. С., Дмитриев Н. М., Розенберг Г. Д. Нефтегазовая гидромеханика. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003, 480 стр.

### **Моделирование, расчет и оптимизация конструкций из композиционных материалов**

*С. К. Голушко*

Рассмотрены различные аспекты математического моделирования современных композиционных материалов и композитных конструкций, а также вопросы разработки численных методов решения краевых задач для жестких систем дифференциальных уравнений [1, 2]. Исследовано влияние структурных и механических характеристик композитов на напряженно-деформированное состояние и уровень нагрузок начального разрушения многослойных армированных круглых, кольцевых и прямоугольных пластин, оболочек вращения различных геометрических форм, гибридных баков и сосудов высокого давления. Рассмотрен и решен ряд задач рационального и оптимального проектирования композитных конструкций.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-12032).

Список литературы

1. Голушко С.К., Идимешев С.В., Шапеев В.П. Разработка и применение метода коллокаций и наименьших невязок к задачам механики анизотропных слоистых пластин // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 5. С. 24-36.

2. Голушко С.К., Идимешев С.В., Семисалов Б.В. Методы решения краевых задач механики композитных пластин и оболочек // Учеб. пособие по курсу «Прямые и обратные задачи механики композитов». КТИ ВТ СО РАН. Новосибирск, 2014. – 131 с. [Электрон. ресурс]. – ISBN 978-5-9905791-0-1.

### **Компактная схема четвертого порядка для прямой задачи рассеяния Захарова – Шабата**

*Н. И Горбенко, В. П. Ильин, Л. Л. Фрумин*

В докладе представлен новый метод решения прямой задачи рассеяния Захарова – Шабата основанный на сведениях этой задачи к двум независимым одномерным краевым задачам. Построены разностные схемы четвертого порядка аппроксимации для этих уравнений. Предложенный алгоритм решения показал высокую эффективность на тестовых задачах по сравнению с традиционным transfer matrix method.

### **Numerical model of plasma-chemical etching technology**

*A. G. Gorobchuk*

The 2D mathematical model of plasma-chemical etching technology, where the flow of gas mixture was described by the equations of multicomponent physical-chemical hydrodynamics, was studied. A presence of two-order elliptic operators in all equations of the mathematical model allow to approximate each equation by implicit iterative finite-difference splitting-up scheme with stabilizing correction. The



hydrodynamic equations of Navier-Stokes were reduced by using variables "stream function - vorticity". The concentrations of reagents were calculated from the convective-diffusion equations using the computed velocity. To approximate the vorticity and diffusion fluxes of reagents at the walls of reactor chamber the directed finite difference of second order was used. A solution of an original steady state problem was derived by relaxation method. The created adequate numerical model of reactor process allows to investigate subtle physical effects of plasma-chemical etching. Particularly, the study of silicon etching in CF<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> mixture was shown that this system is characterized by lower fluorine concentrations and higher CF<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub> coverage of silicon surface compared to the CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> system.

This research was supported by the Russian Fund of Basic Research (grant No.14-01-00274) and by the grant of the President of Russian Federation for state supporting of scientific school (grant No.5006.2014.9).

#### References

1. Grigoryev Yu.N., Gorobchuk A.G. Numerical Simulation of Plasma-Chemical Processing Semiconductors, Micro Electronic and Mechanical Systems. Kenichi Takahata (Ed.). In-Tech Education and Publishing, 2009. P. 185-210.

### **Численное моделирование фильтрации в трещиновато-пористых средах с мерзлотой**

*А. В. Григорьев, Н. М. Афанасьева*

Рассматривается модель двойной пористости для случая трещиновато-пористой среды с учетом мерзлоты. Интерес представляет влияние изменения температуры на функцию обменного перетока между трещинами и пористыми блоками. Функция перетока основывается на разности градиентов давлений. Представлены результаты численного решения модельной двумерной задачи. Вычислительный алгоритм базируется на конечно-элементной аппроксимации по пространству и использованию явно-неявных аппроксимаций по времени, а также схем расщепления по физическим процессам.

Трещиновато-пористая среда рассматривается как система поровых блоков, разделенная системой трещин. Основные запасы флюида хранятся в поровых блоках, трещины, в свою очередь, отвечают за перенос данных запасов. Описанные свойства структуры пустотного пространства трещиновато-пористой среды часто называют средой с двойной пористостью, которая отражена в работе [1]. Заметим, что модель двойной пористости традиционно рассматривается в изотермической постановке. В работе исследуется расширенная модель, которая учитывает наличие мерзлоты [2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-11-10024).

#### Список литературы

1. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П., Кочина И. Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Прикладная математика и механика. 1960. Т. 24, No 5. С. 852–864..

2. Васильев В.И., Максмов А.М., Петров Е.Е., Цыпкин Г.Г. Тепломассоперенос в промерзающих и протаивающих грунтах. - М.: Наука. Физматлит, 1996. -224 с.

### **К неустойчивости одномерных состояний динамического равновесия плазмы**

**Власова – Пуассона**

*Ю. Г. Губарев, А. И. Светоносов*

Модель плазмы Власова – Пуассона остается одной из базовых математических моделей физики плазмы. Это обусловлено ее простотой, наглядностью и полезностью для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС).

Данная модель изучается уже давно. Однако для нее удалось установить лишь достаточные условия устойчивости ряда состояний динамического равновесия к возмущениям из неполных незамкнутых подклассов.

В настоящей работе прямым методом Ляпунова доказано, что одномерные равновесия плазмы Власова – Пуассона, содержащей электроны с неизотропной стационарной функцией распределения и один сорт ионов, чья функция распределения изотропна и постоянна, абсолютно неустойчивы к одномерным же малым возмущениям. При этом обращено известное достаточное условие линейной устойчивости данных равновесий и описана область его применимости. Также получены достаточные условия линейной практической неустойчивости, построена априорная экспоненциальная оценка снизу и указаны начальные данные для растущих возмущений.

Результаты настоящей работы могут пригодиться в процессе создания опытных установок для осуществления УТС.

### **Численное моделирование дисперсионных поверхностных волн на вращающейся сфере**

*О. И. Гусев, Г. С. Хакимзянов*

Для численного моделирования процесса распространения длинных поверхностных волн по вращающейся сфере предложен алгоритм, основанный на расщеплении системы полных нелинейно-дисперсионных уравнений на вращающейся сфере [1] на равномерно эллиптическое уравнение для дисперсионной составляющей давления и гиперболическую систему уравнений мелкой воды первого приближения с модифицированным источниковым членом в правой части уравнения импульса. Алгоритм реализован в виде явной двухшаговой схемы предиктор-корректор, на каждом шаге которой поочередно решаются задачи, полученные в результате расщепления. Выполнено исследование аппроксимационных свойств предложенной схемы, условий устойчивости и сравнение дисперсионных характеристик модели и схемы.

На модельных задачах о распространении волн в акватории с постоянной глубиной дана оценка важности учета эффектов, связанных со сферичностью Земли и ее вращением, а также дисперсионных эффектов в зависимости от дальности распространения волн и размеров области начального возмущения свободной границы. Выполнены тестовые расчёты некоторых исторических и гипотетических цунами на реальной батиметрии, источники которых располагались в ближней и удалённых зонах относительно побережья Российской Федерации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00219).

Список литературы

1. Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Nonlinear-dispersive shallow water equations on a rotating sphere // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 25, No. 1. P. 15–26.

### **Разделение поля упругих деформаций на сумму полей продольных и поперечных деформаций при моделировании процесса распространения упругих волн**

*М. Н. Гуш*

В данной работе рассматривается подход к оптимизации процедуры моделирования процесса распространения упругих волн в неоднородной изотропной среде основанный на разделении поля деформаций на сумму полей деформаций, вызванных продольными и поперечными волнами.

Математическая модель [1], описывающая процесс распространения упругих волн в неоднородной среде предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам в процессе численного решения практических задач.

Из [1] известно, что поле упругих волн можно представить в виде суммы независимо распространяющихся продольных и поперечных волн. Распространение продольных и поперечных волн внутри однородной среды может быть описано с помощью более простых математических моделей, решение которых может быть найдено с существенно меньшими вычислительными затратами.

Подход основанный на комбинации математических моделей для однородных и неоднородных сред может снизить вычислительные затраты.

В работе описывается методика разделения поля, оценивается трудоёмкость предложенной процедуры и рассматриваются перспективы данного подхода при решении практических задач.

Список литературы

1. Теоретическая физика. Том 7. Теория упругости. : для студентов и аспирантов физических специальностей вузов, а также научных сотрудников / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 4-е издание, испр. и доп.. – Москва: Наука, 1987. – 248 с.

### **Численный метод расчета упруго-пластического деформирования МКЭ**

*Р. Л. Давыдов, Л. У. Султанов*

Настоящая работа посвящена разработке и численной реализации методики исследования напряженно-деформированного состояния упругопластических тел с учетом больших перемещений. Используется процедура пошагового нагружения, где разрешающее вариационное уравнение получено из принципа виртуальных мощностей в текущей конфигурации [1, 2]. Пространственная дискретизация основана на методе конечных элементов (МКЭ).

Для решения нелинейной задачи используется инкрементальный метод. В качестве базового уравнения используется уравнение виртуальных мощностей. Получено физическое соотношение в виде зависимости производной Труделла [1, 2] тензора напряжений от деформации скорости.

В рамках теории течения используются аддитивное представление для полной деформации скорости. Предполагается справедливость ассоциированного закона течения. Используется метод проецирования напряжений на поверхность текучести [3]. В качестве критерия упругого деформирования рассмотрено условие Губера – Мизеса. Численная реализация основана на методе конечных элементов на базе восьмиузлового полилинейного элемента. Решенные задачи демонстрируют работоспособность полученной методики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-31-20602, 15-41-02557).

Список литературы

1. Голованов А.И., Султанов Л.У. Математические модели вычислительной нелинейной механики деформируемых сред. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – 465 с.
2. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis. – 1997. – 283 p.
3. Голованов А. И., Султанов Л. У. Исследование закритического упругопластического состояния трехмерных тел с учетом конечных деформаций // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2008. – N 4. – С. 13-16.

### **О топологическом моделировании материалов с покрытиями**

*О. В. Евдокимова*

Исследуется возможность существования дефектов, в том числе не наблюдаемых визуально, в покрытиях материалов путем применения топологического подхода. Берега дефектов покрытия могут быть подчинены различным условиям взаимодействия – контакта без трения, частичного сцепления, отсутствия лишь отдельных компонент напряжений или перемещений и других. Исследуется вопрос распознавания типов таких дефектов методом исследования некоторых спектральных характеристик решений граничных задач. Построены формулы, позволяющие по спектру паспортизировать типы дефектов [1-15].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-96505).

Список литературы

1. Бабешко В.А., Ритцер Д, Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Федоренко А.Г. К теории прогноза сейсмичности на основе механической концепции, топологический подход// ДАН. 2013.Т.450. № 2. 166-170.
2. В.А.Бабешко, О.В.Евдокимова, О.М.Бабешко А.Г.Федоренко, В.Л.Шестопалов. К проблеме покрытий с трещинами в сейсмологии и наноматериалах// МГТ 2013, № 5 С. 39-45.
3. Бабешко В.А. Павлова А.В., Ратнер С.В., Вильямс Р.(США) К решению задачи о вибрации упругого тела, содержащего систему внутренних полостей трещин // ДАН. 2002. Т. 382, №5. С. 625-628.

4. Бабешко В.А., Бабешко О.М. Метод факторизации в краевых задачах в неограниченных областях // ДАН. 2003. Т.392. № 6. С. 767–770.
5. Бабешко В.А., Бабешко О.М. Формулы факторизации некоторых мероморфных матриц-функций // ДАН. 2004. Т. 399, №1. С. 163–167.
6. Бабешко В.А., Бабешко О.М. Метод факторизации решения некоторых краевых задач // ДАН. 2003. Т.389. № 2. С.184–188.
7. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Об автоморфизме и псевдодифференциальных уравнениях в методе блочного элемента// ДАН. 2011.Т. 438. № 5. С. 623-625.
8. Бабешко В.А., Бабешко О.М, Евдокимова О.В. К проблеме исследования материалов с покрытиями // ДАН. 2006. Т. 410. №1. С. 49-52.
9. Бабешко В.А., Бабешко О.М, Евдокимова О.В. К проблеме оценки состояния материалов с покрытиями // ДАН. 2006. Т. 409. №4. С.481-485.
10. Бабешко В.А. Белянкова Т.И., Калинин В.В. Метод фиктивного поглощения в задачах теории упругости для неоднородного полупространства // ПММ. 2002,Т. 66. Вып. 2. С. 276 - 284.
11. Ворович И.И., Бабешко В.А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. М.,1979. 320 с.
12. Бабешко В.А. О системах интегральных уравнений динамических контактных задач // Доклады АН СССР. 1975. Т.220. №6. С.1293–1296.
13. Бабешко В.А. Статические и динамические контактные задачи со сцеплением // Прикладная математика и механика. 1975. Т.39. Вып.3. С. 505–512.
14. Бабешко В.А. Факторизация одного класса матриц-функций и ее приложения // Доклады АН СССР. 1975. Т.223. №5. С. 1094–1097.
15. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Об одной факторизационной задаче Гильберта – Винера и методе блочного элемента // ДАН. 2014.Т.459. № 5. С. 557-561.

### **Численное моделирование неустойчивых процессов в высокотемпературной плазме**

*А. А. Ефимова, Г. И. Дудникова*

В работа представлена численная модель неустойчивых режимов взаимодействия электронного пучка с высокотемпературной плазмой, основанная на кинетическом приближении для электронной и ионной компонент плазмы. Созданы алгоритмы параллельных вычислений с использованием метода частиц-в-ячейках. В численных расчетах параметры пучка и плазмы выбраны в соответствии с данными лабораторных экспериментов по нагреву плазмы в открытой ловушке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН). В случае пучка малой плотности исследована нелинейная эволюция системы пучок-плазма во внешнем магнитном поле, которая сопровождается перекачкой энергии из одной неустойчивой моды в другие.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-00392, 14-01-31220).

### **Конечно-разностный метод для решения задачи о взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса с диэлектриками в приближении нелинейных уравнений Максвелла**

*В. П. Жуков, Н. М. Булгакова, М. П. Федорук*

Описана модель взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного импульса с прозрачными материалами, основанная на нелинейных уравнениях Максвелла и гидродинамических уравнениях для плазмы свободных электронов. Модель учитывает линейную дисперсию, нелинейный эффект Керра, многофотонную ионизацию, ионизацию электронным ударом.

Представлена неявная конечно-разностная схема для решения получающихся уравнений. Для численной устойчивости метода и необходимой точности расчета при построении схемы учтены многочисленные особенности задачи, связанные с наличием свободных электронов, линейной дисперсией, нелинейными эффектами. Также решена проблема выпускающих граничных условий. При этом авторы исходили из компромисса между эффективностью метода и простотой программы. Последнее обеспечивает возможность модификации схемы при изменении модели. Представлены 2- и 3-мерные коды в цилиндрической системе координат. Также создан код в 2-мерной плоской геометрии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-51-46007).

Список литературы

1. Bulgakova N.M., Zhukov V.P., Meshcheryakov Yu.P., Theoretical treatments of ultrashort pulse laser processing of transparent materials: Towards understanding the volume nanograting formation and “quill” writing effect, Appl. Phys. B, vol. 113(3), pp. 437-449, (2013).
2. Bulgakova N.M., Zhukov V.P. Continuum models of ultrashort laser – matter interaction in application to wide-bandgap dielectrics. In: Laser-Surface Interactions for New Materials Production, Springer Series in Materials Science, Vol. 191, Ed. by P.M. Ossi et al. (Springer, 2014). – P. 101-124.
3. Жуков В.П., Булгакова Н.М., Федорук М.П. Численное моделирование распространения фемтосекундного лазерного импульса в нелинейных средах//Выч. технологии. 2012. т. 17. № 4. с. 14-28.

### **Генератор сигналов для отладки и тестирования АСУ ТП на базе имитационных моделей подсистем угольной шахты**

*С. С. Журавлев, В. В. Окольников, И. В. Меркулов, С. В. Рудометов, С. Р. Шакиров*

Современные средства автоматизации технологических процессов представляют собой совокупность программно-аппаратных средств, правильное функционирование которых зависит от корректности работы прикладного программного обеспечения и адекватности разработанных алгоритмов управления. Устранение ошибок в процессе выполнения пуско-наладочных работ и опытной эксплуатации требуют значительно больших затрат ресурсов, чем их устранение на этапе разработки автоматизированной системы.

Для решения задачи обнаружения ошибок на более ранних этапах разработки автоматизированной системы применен подход “in-the-loop” [1], заключающийся в подмене для контура управления автоматизированной системы сигналов от реального технологического оборудования на сигналы, сгенерированные физической, математической или комбинированной моделью технологического процесса. В качестве тестируемых элементов могут выступать модель системы управления, программное или аппаратное обеспечение автоматизированной системы, прототипы устройств управления.

В данной работе рассматривается реализация этого подхода для тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП, разработанных в КТИ ВТ СО РАН. В работе используется имитационная модель технологического процесса добычи угля.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-07-98023).

Список литературы

1. Ryssel U., Ploennigs J., Kabitzsch K., Folie M. Generative Design of Hardware-in-the-Loop Models // APGES'07 — Salzburg, Austria, 2007. — С. 4-11.

### **Математическое моделирование неравновесных газодинамических процессов методом RKDG**

*А. А. Захаров, Ю. И. Димитриенко, М. Н. Коряков*

В работе проведено развитие численного метода RKDG (Runge – Kutta Discontinuous Galerkin) для решения задач гиперзвуковой неравновесной газовой динамики [1] для модели вязкого химически реагирующего газа.

На первом этапе решается задача динамики идеального газа. На втором учитывается вязкость и теплопроводность газа, но не учитывается конвекция. Для нахождения численного потока при решении системы Эйлера используется метод HLLC [2], и для устранения нефизических осцилляций решения применяется TVD ограничитель [3]. Для поиска численных потоков при решении уравнений на втором этапе используются центральные потоки.

На третьем этапе решаются уравнения химической кинетики за 3 шага. Сначала учитывается приток массы  $i$ -го элемента за счет химических превращений. Система решается итерационным явно-неявным методом. Далее учитывается конвекция, а затем диффузия химических компонентов.



Для интегрирования получающихся уравнений также применяется метод RKDG аналогично первому и второму этапам решения газодинамических уравнений с конвективными и диффузионными членами.

Представлены результаты численного моделирования обтекания сферического затупления набегающим гиперзвуковым потоком.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-3007.2015.8 Работа выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова [5].

Список литературы

1. Коряков М.Н., Захаров А.А., Димитриенко Ю.И. Численное моделирование трёхмерных гиперзвуковых газовых потоков методом RKDG. Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Томск, 2013. С. 22.
2. Cockburn B., Shu Chi-Wang Runge–Kutta Discontinuous Galerkin Methods for Convection-Dominated Problems // Journal of Scientific Computing. 2001. V. 16, iss. 3.
3. Eleuterio F. Toro Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2009.
4. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит, 2012.
5. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А., Соболев С.И., Антонов А.С., Брызгалов П.А., Никитенко Д.А., Стефанов К.С., Воеводин Вад.В. Практика суперкомпьютера "Ломоносов". Открытые системы. - Москва: Издательский дом "Открытые системы", № 7, 2012. С. 36-39.

## **Тензор Грина уравнений Ламэ теории упругости при транспортных нагрузках**

*Г. К. Кайшибаева, Л. А. Алексеева*

Рассматривается система уравнений Ламэ, описывающая динамику изотропной среды при действии стационарных транспортных нагрузок для дозвуковых, транс- и сверхзвуковых скоростей их движения. Фундаментальные и обобщенные решения системы уравнений Ламэ рассмотрены в подвижной системе координат, связанной с транспортной нагрузкой. Исследуются ударные волны, которые возникают в среде при сверхзвуковых скоростях движения. Получены условия на скачки напряжений, скоростей перемещений, энергии на фронтах ударных волн с использованием теории обобщенных функций. Приведены результаты численных экспериментов по исследованию динамики упругой среды при дозвуковых, транс- и сверхзвуковых скоростях движения сосредоточенных транспортных нагрузок.

Список литературы

1. Алексеева Л.А. Фундаментальные решения в упругом пространстве в случае бегущих нагрузок // Прикладная математика и механика. 1991. Т.55. №5. С.854-862.
2. Алексеева Л.А. Обобщенные решения уравнений Ламе в случае бегущих нагрузок. Ударные волны// Математический журнал.- 2009.- Т.9.- №1(31).- С.16-25.
3. Кайшибаева Г.К. Алексеева Л.А. Динамика упругой среды при действии трансзвуковых транспортных нагрузок // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика [Электронный ресурс] / Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011, Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2011, № гос. Регистр.– 0321101160

## **О некоторых подходах к моделированию фильтрационного горения газа**

*Т. А. Кандрюкова, Ю. М. Лаевский*

Данная работа является продолжением исследования процесса фильтрационного горения газов [1], описываемого в статье авторов [2]. Целью доклада является представление еще одного подхода к решению подобного рода задач. Работа содержит две основные части. Первая часть – это описание модели, основанной на системе уравнений первого порядка в терминах "температура – тепловой поток", "масса – диффузионный поток" с введением понятия потока полной энтальпии. Такой подход позволит обеспечить точное выполнение сеточных законов сохранения, что, на наш взгляд, является чрезвычайно важным для данного класса задач. Вторая часть работы связана с введением понятия мгновенной скорости фронта горения и с предложениями по устойчивому способу ее вычисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-11-10024).

Список литературы

1. Бабкин В. С., Лаевский Ю. М. Фильтрационное горение газов. Физика горения и взрыва, 1987. Т. 23, № 5. С. 27–44.
2. Кандрюкова Т. А., Лаевский Ю. М. О численном моделировании фильтрационного горения газов на многоядерных вычислительных системах. Сибирский журнал индустриальной математики, 2014. Том XVII, № 1(57), с. 55-64.

### **Математическое моделирование процессов диффузии в пленке на основе хитозана**

*Г. Р. Карамутдинова, И. М. Губайдуллин, Е. И. Кулиш, К. Ф. Коледина*

Для полимерных пленок, применяемых при лечении кожных повреждений, необходимо длительно поддерживать требуемый уровень лекарственного препарата в крови или тканях пациента [1]. Это достигается оптимальным составом плёнки, временем предварительной обработки её при разных температурах. Как известно, оптимизационные задачи эффективно решают, используя современные методы информационных технологий [2]. Данная работа основана на математическом описании прямой задачи процесса диффузии [3] в пленке-хитозан, которая по сравнению с другими полимерами не уступает по прочности и прозрачности, лучше сорбирует влагу, имеет заметно большую влагопроницаемость, биоразлагаема [4].

Решена обратная задача по нахождению коэффициента диффузии лекарственного вещества по наблюдаемым экспериментальным данным и сделаны физико-химические выводы: чем больше температура термообработки пленки, тем меньше коэффициент диффузии, и чем больше состав лекарственного вещества в пленке, тем меньше коэффициент диффузии. Была найдена оптимальная температура термомодификации пленки, при которой достигается минимальный коэффициент диффузии.

Список литературы

1. Шуршина А.С. Сорбционные и транспортные свойства пленок на основе хитозана. Уфа: БашГУ, 2014.
2. Губайдуллин И.М. Информационно-аналитическая система решения многопараметрических обратных задач химической кинетики // диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / ГОУВПО Башкирский государственный университет. Уфа, 2012
3. Галлямов М.О. Диффузия в полимерах: Визуализация решений типичных задач диффузии. М.: КРАСАНД, 2014. – 248 с.
4. Николаев, А.Ф. Влагопроницаемость и влагопоглощение хитозановых пленок / А.Ф. Николаев, А.А. Прокопов, Э.С. Шульгина // Журнал прикладной химии. – 1985. - Т. LVIII, № 7. – С. 1676-1679.

### **Полулагранжевый подход к численному решению уравнений Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости**

*Е. Д. Карпова, Е. В. Дементьева, В. В. Шайдулов*

В настоящей работе обсуждается полулагранжевый подход к численному моделированию течений вязкой несжимаемой жидкости в трубе на основе уравнений Навье – Стокса. На границе вытока рассмотрено модифицированное граничное условие “do nothing” [1].

Для построения дискретного аналога используется комбинированный подход: для аппроксимации транспортных производных используется полулагранжевый метод [2] (с возможностью повышения порядка точности), для аппроксимации остальных членов уравнения (задачи Стокса) построен метод конечных элементов. Компоненты скорости аппроксимируются биквадратичными элементами, давление – билинейными конечными элементами. В результате на каждом временном шаге решается стационарная линейная задача, для которой выполняется условие Ладженской – Бабушки – Бретци [3]. Задача решается многосеточным методом.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00296-а).

## Список литературы

1. Rannacher R. Incompressible Viscous Flow // Encyclopedia of Computational Mechanics. 2011. V. 3. Fluids. Chapter 6.
2. Pironneau O. On the Transport-Diffusion Algorithm and Its Applications to the Navier-Stokes Equations // Numerische Mathematik 38. 1982. P. 309–332.
3. F. Brezzi, and M. Fortin, Mixed and Hybrid Finite Element Methods, Springer-Verlag, New York, 1991.

**Дискретно-непрерывная модель движения людей**

*Е. С. Кирик, А.В. Малышев*

Компьютерным моделированием движения людей решают задачу об определении времени эвакуации из отдельных помещений, этажей, здания в целом. В настоящее время методы моделирования движения людей (эвакуации) интенсивно развиваются.

Модель принадлежит классу индивидуально-поточных, когда моделируется движение каждого отдельного человека с учетом наличия других участников движения и граничных условий [1, 2]. Модель является непрерывной по пространству в выбранном направлении, но предполагается лишь конечное число направлений, куда может сдвинуться человек из текущей позиции. Можно моделировать следующие явления, свойственные поточному движению: слияние, переформирование (растекание, уплотнение), неодновременность слияния потоков, образование и рассасывание скоплений, обтекание поворотов, движение в помещениях с развитой внутренней планировкой, противотоки и пересекающиеся потоки. Предусмотрена возможность учета изменения видимости (например, по причине задымления), информированности людей о планировке здания, использование различных стратегий движения (кратчайшего пути и кратчайшего времени). Размеры и формы проекции людей, скорости свободного движения могут задаваться индивидуально в зависимости от цели моделирования. Скорость движения человека зависит от плотности и удовлетворяет известным зависимостям изменения скорости с изменением плотности потока. Может быть учтена, согласно данным натурных наблюдений, зависимость скорости от возраста, эмоционального состояния, группы мобильности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН на 2012-2014 годы № 49.

## Список литературы

1. Kirik E., Yurgel'yan T., Malyshev A. On discrete-continuous stochastic floor field pedestrian dynamics model SIGMA.DC // In the book "Emergency evacuation of people from buildings", 2011. P. 155-161.
2. Kirik E., Malyshev A., Popel E. Fundamental diagram as a model input – direct movement equation of pedestrian dynamics // In the proceedings of the International conference "Pedestrian and Evacuation Dynamics`2012" (Eds.: U. Weidmann, U. Kirsch, M. Schreckenberg), Springer, 2014. P. 691-702.

**Математическое моделирование образования геранилпирофосфата в растениях**

*О. Ю. Кирьянова*

Данная работа основана на математическом моделировании синтеза геранилпирофосфата в растениях [1]. Был проведен теоретический расчет констант скоростей частных реакций процесса образования геранилпирофосфата в программе Gaussian 9.0 [2]. На основе полученных данных была составлена кинетическая модель данного процесса. Было проведено решение прямой кинетической задачи [3]. Полученные данные позволили определить оценочные параметры протекания как частных реакций, так и всего механизма в целом.

## Список литературы

1. Ruzicka L., The Isoprene Rule and the Biogenesis of Terpenic Compounds, Experimentia, 9, 357 – 396, 1953.
2. Joseph W. Ochterski. Thermochemistry in Gaussian, 2000, Gaussian Inc.
3. Тихонова М.В., Губайдуллин И.М., Спивак С.И. Численное решение прямой кинетической задачи методами Розенброка и Мишельсена для жестких систем дифференциальных уравнений // Журнал СВМО. 2010. Т. 12, №2. С. 26-33.

### **Алгоритмы расщепления в методах конечных разностей и конечных объемов**

*В. М. Ковеня, П. В. Бабинцев, А. А. Еремин*

Для численного решения многомерных задач в приближении уравнений Эйлера и Навье – Стокса сжимаемого теплопроводного газа предложен класс эффективных конечно-разностные и конечно-объемных схем, основанных на идеологии расщепления и методе предиктор-корректор. Введенное специальное расщепление исходных уравнений позволило свести реализацию численных алгоритмов на дробных шагах к эффективным скалярным прогонкам или к схемам бегущего счета.

Апробация алгоритмов проведена на решении ряда задач. В рамках уравнений Эйлера исследован режим регулярного и нерегулярного отражения скачков в угловых конфигурациях. В приближении уравнений Навье – Стокса проведены расчеты обтекания цилиндра с иглой различных конфигураций сверхзвуковым потоком газа. Исследовано сверхзвуковое обтекание цилиндра с юбкой с возникновением зон возвратного течения в области основания юбки. Проведенные расчеты и сравнения с результатами экспериментальных исследований позволяют сделать вывод об эффективности предложенных алгоритмов и их достаточной точности расчетов даже без применения сгущения сеток в областях больших градиентов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00191).

### **Явление хаоса в математической модели альтернативного сплайсинга МРНК**

*В. В. Когай, Т. М. Хлебодарова, С. И. Фадеев, В. А. Лихошвай*

В работе проведен теоретический анализ динамики функционирования модели простейшей генетической системы, состоящей из одного гена, экспрессия которого контролируется по механизму обратной связи изоформами белка, синтезируемыми в результате альтернативного сплайсинга и обладающих противоположными регуляторными свойствами – активаторными и репрессорными.

Рассматриваемая модель при определенных значениях параметров демонстрирует регулярную динамику с различными сценариями перехода к хаотической, что указывает на возможность порождения хаоса в природных генетических системах за счёт альтернативного сплайсинга.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00344).

### **Проблемы применения масштабируемого математического моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях**

*А. С. Козелков*

Совершенствование вычислительных технологий идет по пути перехода от анализа отдельных конструктивных элементов к всеобъемлющему анализу поведения технологических комплексов в целом. Достижения вычислительной гидродинамики позволяют уйти от расчета обособленных частей и включить в рассмотрение специфические особенности. Требования, предъявляемые к процессу математического моделирования, не могли не сказаться на развитии методов вычислительной гидродинамики [1]. В настоящее время все больший акцент делается на построение эффективных методов расчета на произвольных неструктурированных сетках, состоящих из многогранников произвольной формы [3]. Длительный опыт применения методов вычислительной гидродинамики в интересах решения промышленных задач показал, что наиболее важными являются турбулентность и время проведения расчета [2, 3].

В докладе представлены результаты исследований по применению современных численных методов и моделей турбулентности для решения промышленных задач. Акцент сделан на применении произвольных неструктурированных сеток на машинах петафлопсного класса.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта офи\_м № 13-07-12079).

## Список литературы

1. Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н., Карпенко А.Г., Козелков А.С., Тетерина И.В., Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках. // Москва: Физматлит, 2013. 536 с., ISBN 978-5-9221-1542-1.

2. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Лашкин С.В., Силаев Д.П., Симонов П.Г., Тятюшкина Е.С. Реализация метода расчета вязкой несжимаемой жидкости с использованием многосеточного метода на основе алгоритма SIMPLE в пакете программ ЛОГОС // Журнал ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, 2013, вып.4, стр. 44-56.

3. Козелков А.С., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С., Пучкова О.Л. Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей // Матем. моделирование, №26, т.8 2014, с.81–96.

### **Моделирование цунами космогенного происхождения в рамках уравнений Навье – Стокса**

*А. С. Козелков, А. А. Куркин, Е. Н. Пелиновский*

Представлено краткое описание физико-математических и численных моделей для моделирования космогенных цунами, а также перспективы использования усовершенствованных моделей [1]. Проанализированы результаты моделирования цунами космогенного происхождения различными источниками начального возмущения [2]. Рассматривается параметризованный источник, задаваемый аналитически и источник, полученный численным решением системы уравнений Навье – Стокса. Представлены результаты численного моделирования возмущений в воде, возникших при вхождении метеорита в озеро Чебаркуль [3]. Рассмотрено два случая – вхождение метеорита в озеро, покрытое льдом (как это было в феврале 2013 г.), и безо льда для оценки амплитуды возможной волны в случае падения в летний период. Исследовано влияние угла входа тела в воду на характеристики возникающих волн в ближней зоне. Изучены размеры области возмущения и выявлены закономерности изменения параметров источника.

## Список литературы

1. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Цунами космогенного происхождения // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 2(104). С. 26-35.

2. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Курулин В.В. Моделирование цунами космогенного происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса с источниками различных типов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. №2. С. 142-150.

3. Копейкин В.В. и др. Георадарное обследование места падения Чебаркульского фрагмента метеорита "Челябинск" // Материалы и доклады международной научно-практической конференции "Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль" Чебаркуль 21-22 июня 2013 г. 2013. С. 108-118.

### **Численное моделирование 3D интенсивных пучков заряженных частиц на неструктурированных сетках**

*А. Н. Козырев, А. В. Петухов, В. М. Свешников*

Рассматриваются алгоритмы и технологии моделирования движения плотных пучков заряженных частиц в электростатических полях на неструктурированных тетраэдральных сетках. Трехмерная расчетная область задается при помощи специально разработанного графического процессора GeomBox [1]. Сетка строится при помощи известного сеточного генератора NetGen [2]. Разработаны экономичные алгоритмы распределения объемного заряда на неструктурированных сетках. Проводится выделение прикатодной особенности. Разработанные алгоритмы и технологии реализованы в виде начальной версии пакета прикладных программ ЭРА – 3D. Даются примеры численных расчетов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 4-11-00485).



## Список литературы

1. Козырев А.Н., Молчанов А.В. Графический процессор GeomBox для задания трехмерных областей сложной формы и краевых условий // [Electron. resource]. <http://sourceforge.net/projects/netgen-mesher/>.

**Численное моделирование задач пороупругости для пластин**

*А. Е. Колесов, П. Н. Вабищевич*

Рассматриваются проблемы численного моделирования задач пороупругости для пластин [1,2]. Математическая модель включает эллиптическое уравнение четвертого порядка (бигармоническое уравнение) для вертикальных перемещений пластины и параболическое уравнение для давления жидкости в порах пластины. Для аппроксимации по пространству используется метод конечных элементов. Для дискретизации по времени применяется двухслойная схема с весами, для которой формулируются стандартные условия устойчивости. Численная реализация данной схемы основана на решении связанной системы уравнений для перемещений и давления. В работе на основе принципа регуляризации разностных схем А.А. Самарского строятся безусловно устойчивые схемы расщепления по физическим процессам [3,4,5], когда переход на новый временной слой связывается с решением отдельных задач для перемещений и давления (температуры).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00785).

## Список литературы

1. Taber L.A. Poroelastic Plate and Shell Theories Solid Mechanics and Its Applications // под ред. A.P.S. Selvadurai. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996. – 323–337с.

2. Lagnese J. Modelling Analysis and Control of Thin Plates / J. Lagnese, J.-L. Lions – Paris: Masson, 1988.

3. Самарский А. Теория разностных схем / А. . Самарский – Москва: Наука, 1989.

4. Vabishchevich P.N. Additive operator-difference schemes. Splitting schemes. / P. N. Vabishchevich – de Gruyter, 2014.

5. Вабищевич П.Н. Схема расщепления для задач пороупругости и термоупругости / П. Н. Вабищевич, М. В. Васильева, А. Е. Колесов // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2014. Т. 54. № 8. 1345–1355с.

**Численное моделирование процессов теплопередачи в сверхтекучем гелии**

*Л. П. Кондаурова*

Мотивация исследования процессов теплопередачи в сверхтекучем гелии связана с тем, что теория сверхтекучей турбулентности является важной во многих прикладных задачах. При исследовании процессов теплопередачи используются уравнения гидродинамики сверхтекучей турбулентности (ГСТ). Для описания тепловых импульсов малой амплитуды справедливо так называемое адабатическое приближение, соответствующее ситуации, когда плотность вихревого клубка успевает подстраиваться под изменение гидродинамических параметров. При непрерывной подаче теплого потока на нагреватель гелий вскипает. Упрощенная система ГСТ позволяет исследовать распределение температуры в объеме жидкости и определять времена вскипания. Для нахождения численного решения применяется метод характеристик второго порядка точности. Для исследования динамики интенсивных тепловых импульсов и нестационарного теплообмена в сверхтекучем гелии используются уравнения ГСТ, учитывающие члены второго порядка малости. Данная система уравнений позволяет исследовать динамику интенсивных волн второго звука, взаимодействующих с собственными вихрями при различных температурах, когда коэффициент нелинейности второго звука принимает положительное, отрицательное и нулевое значения. Для нахождения численного решения применяется метод распада разрыва.

**Проблемы математического моделирования разработки нетрадиционных запасов углеводородов**

*А. В. Королёв, В. Б. Бетелин, В. А. Юдин, И. В. Афанаскин, С. Г. Вольпин*

Одной из возможностей стабилизации добычи нефти в России является освоение потенциала кремнисто-глинистых и карбонатно-кремнисто-глинистых битумонасыщенных пород Западной

Сибири, в первую очередь, баженовской свиты [1]. Наиболее перспективным для этой цели является метод с закачкой в пласт воздуха и инициирование в пласте подвижного очага окисления с выделением тепла (названный по предложению А.А. Боксермана "термогазовым воздействием" (ТГВ)). Это делает возможным пиролиз керогена с образованием газов и жидких углеводородов, получаемая в пласте дополнительная нефть может быть добыта.

Для достоверного моделирования таких процессов необходимо предварительное проведение комплекса экспериментальных исследований: типа реакций, кинетики, тепловыделения в процессах окисления и горения углеводородов [2]; определения теплофизических свойств пород и насыщающих их флюидов с учётом их зависимости от температуры; возможного термического преобразования минералов скелета пород [3]. Такие исследования должны быть выполнены с использованием образцов нефтей и пород предполагаемых к разработке объектов.

Сформулированы дифференциальные уравнения, описывающие указанные процессы. Показаны трудности, возникающие при моделировании ТГВ: сочетание крупно- и мелкомасштабных неоднородностей различного вида, наличие подвижных зон горения или окисления небольшой протяженности с большим контрастом температур, способным вызывать значительные механические деформации пород. Обоснована необходимость суперкомпьютерных технологий для практической реализации такого воздействия; оценена необходимая производительность компьютерных систем.

Список литературы

1. Бетелин В.Б., Юдин В.А., Афанаскин И.В., Вольпин С.Г., Кац Р.М., Королёв А.В. Создание отечественного термогидросимулятора – необходимый этап освоения нетрадиционных залежей углеводородов России. М.: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2015. – 206 с.

2. Бетелин В.Б., Юдин В.А., Королёв А.В., Афанаскин И.В., Вольпин С.Г. Моделирование химических реакций окисления и горения углеводородов при добыче нефти с закачкой в пласт воздуха. М.: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2015. – 161 с.

3. Бетелин В.Б., Юдин В.А., Афанаскин И.В., Вольпин С.Г., Королёв А.В. Термические преобразования скелета пород при добыче нефти с закачкой в пласт воздуха. М.: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 2015. – 204 с.

### **Математическое моделирование образования крупных астрофизических объектов в космологическом контексте**

*И. М. Куликов*

В докладе представлены результаты вычислительных экспериментов по крупномасштабному космологическому моделированию. В рамках доклада представлен новый гидродинамический код CosmoPhi для численного решения космологических задач на суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi [1]. В работе подробно описана математическая модель крупных астрофизических объектов, включая subgrid-physics процессы, численные методы решения гиперболических уравнений, описание особенностей параллельной реализации и анализ производительности программного кода.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-31-20150 мол\_a\_вед).

Список литературы

1. Kulikov I.M., Chernykh I.G., Snytnikov A.V., Glinskiy B.M., Tutukov A.V. AstroPhi: A code for complex simulation of dynamics of astrophysical objects using hybrid supercomputers // Computer Physics Communications. 2015. V. 186. P. 71-80.

### **Численное моделирование динамических процессов в электронных пучках мощных мазеров на циклотронном резонансе**

*А. Д. Кунцевич, В. Н. Мануилов*

Мазеры на циклотронном резонансе (МЦР) наиболее перспективные источники мощного электромагнитного излучения в миллиметровом диапазоне волн. Энергия излучения черпается из вращательного движения электронов винтового пучка (ВЭП). Поэтому актуальной является задача увеличение доли  $t_{\perp}$  колебательной энергии частиц до величин 0.7-0.8. Однако большие  $t_{\perp}$  приводят к захвату и накоплению электронов в адиабатической ловушке между электростатическим и магнитным зеркалами и потере устойчивости ВЭП.

Поиск устойчивых ВЭП возможен на базе динамической модели пучка, использующей метод крупных частиц. В докладе обсуждаются подходы, позволяющие значительно (на порядок и более) сократить время вычислений при числе частиц несколько миллионов. Описана физическая модель, учитывающая наиболее существенные факторы, влияющие на захват частиц и возникновение колебательных режимов в ВЭП (тепловые скорости, шероховатости эмиттера, поле пространственного заряда, вторично-эмиссионное размножение захваченных частиц при бомбардировке катода). Проведено сравнение процессов захвата и развития колебательных режимов в ВЭП для МЦР различных частотных диапазонов.

### **Реализация экономичного явно-разрешимого алгоритма с контролируемым дисбалансом полной энергии для трехмерных линейных задач теории упругости**

*Г. Г. Лазарева*

С целью реализации общей теории построения и обоснования явно-разрешимых полностью консервативных сопряжено-согласованных дискретных моделей для статических и динамических задач теории упругости и вязкоупругости, созданной А.Н. Коноваловым [1,2], разработана программная документация (задание на программирование). На основе этой теории возможна реализация на высокопроизводительных кластерах "классических" задач теории упругости. В качестве таковой рассматривается задача о построении теоретических сейсмограмм. В процессе создания программы проведено теоретическое обоснование используемых алгоритмов в трехмерных задачах динамики для сложнопостроенных сред [1,2] и разработана программная документация. Алгоритм основан на использовании созданного адаптивного экономичного итерационного метода без привлечения априорной спектральной информации. Непрерывной модели поставлена в соответствие дискретная модель (разностная схема) как реализация одного из этапов триады А. А. Самарского: модель-алгоритм-программа на ЭВМ. Осуществлен переход от непрерывной операторной модели к операторной разностной схеме. В докладе представлен переход от операторной разностной схемы к заданию на программирование.

Список литературы

1. Коновалов А.Н. Экономичные дискретные реализации для динамической задачи линейной теории упругости // Дифференц. уравнения. 2011. т. 47. № 8. с.1140-1147.
2. Коновалов А.Н. Полностью консервативные разностные схемы для динамических задач линейной теории упругости и вязкоупругости // Дифференц. уравнения. 2013. т. 49. № 7. с.885-896.

### **Потенциальный 3D вихрь в обтекающем потоке**

*А. В. Лежнев, В. Г. Лежнев*

Представлен алгоритм решения задачи обтекания произвольной ограниченной 3D области потенциальным потоком несжимаемой жидкости с заданной скоростью на бесконечности, иницирующим в этой области потенциальный вихрь. Алгоритм опирается на нетрадиционный метод решения внешней задачи Неймана в виде ньютонова потенциала, использующий полные (на границе) системы функций [1]. Рассматриваемый алгоритм метода базисных потенциалов может применяться в задачах обтекания узкого тела.

Список литературы

1. Лежнев А.В., Лежнев В.Г. Метод базисных потенциалов в задачах математической физики и гидродинамики. Краснодар: Кубанский гос. Ун-т., 2009. – 111 с.

### **Ion-acoustic shocks with reflected ions: particle-in-cell and hybrid simulations**

*T. V. Liseykina, G. I. Dudnikova, V. A. Vshivkov*

Numerical simulation of the ion-acoustic collisionless shock with self-consistently reflected ions is obtained. Three different models are considered. The first model corresponds to the conventional Boltzmannian electron distribution in which case the shock Mach number only insignificantly increases with the number of reflected ions from Max number  $M=1.6$  (no reflection) to  $M=1.8$  (strong reflection). The

second model corresponds to adiabatically trapped electrons producing a stronger increase Max number from  $M=3.1$  to  $M=4.5$ . Both these hybrid models are based on kinetic approximation for ion plasma component. The third model is based on kinetic approximation of ions and electrons as well. Particle-in-cell (PIC) method is used for solving Vlasov equations. The electrostatic field is obtained by direct integration of the charge density, which in turn is calculated from the individual particle positions. The reflection efficiency, velocity distribution of reflected particles and the shock electrostatic structure are studied. This research is relevant to the electrostatic shock propagation in laser-produced plasmas, especially to the monoenergetic ion beam generation, to the ion injection into the diffusive shock acceleration in astrophysical shocks, and other shock related processes in astrophysical and space plasmas.

The project has been partially supported by grants RFBR N 14-07-00241, RFBR N 14-01-00392.

### **Численное моделирование поведения конденсата Бозе – Эйнштейна на основе трехмерного уравнения Гросса – Питаевского**

*Ю. В. Лиханова, С. Б. Медведев, М. П. Федорук, П. Л. Чаповский*

Конденсат Бозе – Эйнштейна (БЭК) — это агрегатное состояние материи, характеризующееся тем, что макроскопическое число атомов занимают одно и то же квантовое состояние, т.е. квантовые эффекты проявляются на макромасштабах. Этим объясняется большой экспериментальный и теоретический интерес к исследованию БЭК. Данная работа была инициирована экспериментальной работой [1], в которой исследовался разлет конденсата после выключения внешнего поля.

В работе рассматривается трехмерное уравнение Гросса – Питаевского. Задача исследования поведения БЭК разбивается на 2 подзадачи: 1) нахождение стационарного состояния конденсата с включенной удерживающей ловушкой (соответствующего основному состоянию системы) и 2) изучение поведения конденсата после ее выключения. Для решения этих подзадач был реализован численный алгоритм на основе расщепления по физическим процессам с применением быстрого преобразования Фурье. Работа алгоритма была согласована с результатами вариационного подхода (описанного в работе [2] для двумерного уравнения Гросса – Питаевского). Было получено качественное соответствие численных результатов по разлету конденсата с результатами физического эксперимента, представленного в работе [1].

Список литературы

1. Чаповский П.Л. Бозе-эйнштейновская конденсация атомов рубидия // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95, № 3, Р. 148–152
2. Медведев С.Б., Лиханова Ю.В., Федорук М.П., Чаповский П.Л. Эволюция стационарного состояния в двумерном уравнении Гросса – Питаевского // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100, вып. 12, С. 935–940

### **Оценка вероятности захвата в резонанс при спуске твердого тела с изменяемой инерционной асимметрией в атмосфере**

*В. В. Любимов*

При спуске в атмосфере асимметричного твердого тела возможна реализация длительного резонанса. Длительный резонанс приводит к переходу от вращательного движения ТТ к колебательному (реализуется захват в резонанс). Проход через резонанс наблюдается при кратковременном совпадении частот системы, не сопровождающегося увеличением угла атаки. Начальные условия, приводящие к захвату и проходу через резонанс, перемешаны на сепаратрисеслучайным образом [1]. Для вычисления вероятности захвата в резонанс традиционно применяется выражение [2].

Решается задача об оценке вероятности захвата в резонанс при атмосферном спуске ТТ с изменяемой инерционной и неизменной аэродинамической асимметриями.

Список литературы

1. Лифшиц И.М., Слущкина А.А., Набутовский В.М. О явлении рассеяния заряженных квазичастиц на особых точках в  $p$  – пространстве // Доклады АН СССР. 1961. Т.137. № 3. С. 553–556.
2. Нейштадт А.И. Прохождение через сепаратрису в резонансной задаче с медленно изменяющимся параметром // Прикладная математика и механика. 1975. Т.39. С. 621–633.

## **Задачи плоскопараллельных вихревых течений и алгоритмы**

*А. Н. Марковский, В. Г. Лежнев*

Рассматриваются различные модели 2D течений несжимаемой жидкости, основанные на интегральных представлениях функции тока.

Основной класс рассматриваемых течений – течения с минимальной среднеквадратической завихренностью. Функция тока течения является бигармонической функцией. Если задана скорость на границе, то дело сводится к решению краевой задачи бигармонического уравнения, как, например, для 2D задачи Стокса при ее расщеплении. Используются проекционные алгоритмы решения краевых задач для однородного и неоднородного бигармонического уравнения в сложных областях. Для подпространства гармонических функций получена полная система точечных потенциалов, являющаяся инструментом решения различных задач. Исследуется задача образования приграничных вихрей в канале.

Важную роль играет потенциал Робена, получены проекционные алгоритмы решения задачи Робена. Получены системы функций, полные на границе области, создающие основу несеточного метода (метода базисных потенциалов) решения краевых задач гидродинамики [1].

Рассматривается понятие собственного вихря области – присоединенного вихря течения Робена, вихря с минимальной завихренностью.

Рассматривается расширенная формулировка задачи построения плоскопараллельных течений, когда не требуется задания граничных скоростей (вообще говоря, не известных как, например, для трубки Вентури). Решение строится только по граничным значениям функции тока. Такое решение единственно в классе течений с бигармонической функцией тока. Численные решения для трубки Вентури показывают на характерные особенности течений в расширяющихся и сложных каналах. Гармоническая плотность вихрей течения должна быть ортогональна плотности вихрей собственного вихря области.

Используя общее решение задачи обтекания профиля и алгоритмы метода распределенных вихрей исследуется задача обтекания с вихревым погранслоем и вихревой зоной отрыва.

Список литературы

1. Лежнев А.В., Лежнев В.Г. Метод базисных потенциалов в задачах математической физики и гидродинамики. Краснодар: Кубанский гос. Ун-т., 2009. – 111 с.

## **The increase of particle-in-cell method accuracy for hybrid supercomputers using C++ templates**

*Е. А. Mesyats, А. V. Snytnikov*

The goal of the present work is the development of parallel numerical methods for the solution of some specific sort of plasma physics problems. These problems are dominated by the plasma instabilities. These problems are to be studied within the kinetic approach [1]. It means the use of Particle-In-Cell (PIC) method. Thus the reduce of the numerical noise is the question of great importance. Moreover, the noise must be reduced without the particle number increase. Also, noise reduction and accuracy increase must be achieved without rewriting of the code, only small separate code parts being changed.

In order to reduce the noise level particle form-factors of different shape were being used. The shape was the B-spline of the 2 and 3 order. The form-factors are quickly and simply replaced in the code by the use of C++ templates with Esirkepov [2] exact charge conservation scheme for Particle-in-Cell simulation with an arbitrary form-factor. The simulation domain is implemented as a template class with the Cell class being template parameter. One of the Cell class methods is the form-factor. In such a way, the use of higher order form-factors gives the more accurate simulation result, and the C++ templates facilitate the quick and easy form-factor replacement.

This work was supported by The Russian Science Foundation (Grant No. 14-12-00043). Development of the code was supported by RFBR (Grants 15-31-20150, 14-01-00392 and 14-07-00241). Simulations are performed at Siberian Supercomputer Center SB RAS.

References

1. K.V.Lotov, I.V.Timofeev, E.A.Mesyats, A.V.Snytnikov, V.A.Vshivkov. Note on quantitatively correct simulations of the kinetic beam-plasma instability. // Physics of Plasmas, 22, 024502 (2015)



2. T.Zh. Esirkepov Exact charge conservation scheme for Particle-in-Cell simulation with an arbitrary form-factor // Computer Physics Communications. Computer Physics Communications. 2001. V. 135, iss. 2. P. 144-153.

### **Численное моделирование распространения акусто-гравитационных волн в неоднородной модели земля – атмосфера при наличии стратификации ветра в атмосфере**

*А. А. Михайлов*

При математическом моделировании сейсмических волновых полей внутри упругой среды обычно полагают, что поверхность среды граничит с вакуумом и задают граничные условия на свободной поверхности. Тем самым полагают, что на границе сейсмические волны абсолютно отражаются, при этом пренебрегают эффектом генерации упругими волнами акусто-гравитационных волн в атмосфере и их взаимодействием при распространении вдоль границы. В последнее десятилетие появились теоретические и экспериментальные исследования, в которых показана высокая степень взаимосвязи между волнами в литосфере и атмосфере. В данной работе рассматриваются результаты численного моделирования распространения сейсмических и акусто-гравитационных волн для совмещённой модели атмосфера – земля. В рассматриваемой постановке задачи исходная система записывается в виде гиперболической системы первого порядка для трёхмерной Декартовой системы координат. При распространении акусто-гравитационных волн в изотермической атмосфере учитывается зависимость плотности воздуха и скорости ветра от высоты. Параметры упругой среды (плотность и скорости продольных и поперечных волн) имеют зависимость по двум пространственным координатам, а по третьей координате среда считается однородной. Используемый алгоритм для решения поставленной задачи построен на комбинировании интегральных преобразований с конечно-разностным методом. Алгоритм основан на применении интегрального преобразования Лагерра по временной координате.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-05-00867).

### **Моделирование волновых процессов в флюидонасыщенной пористой среде**

*А. А. Михайлов, А. С. Бердышев, Х. Х. Имомназаров*

В работе рассматривается алгоритм численного решения динамической задачи распространения сейсмических волн для пористой среды в обратимом приближении. Упругие параметры среды взаимно-однозначно выражаются тремя скоростями упругих колебаний. Распространение сейсмических волн в пористой среде, насыщенной флюидом, при отсутствии потери энергии описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка в Декартовой системе координат. Исходная система записывается в виде гиперболической системы в терминах скоростей упругой вмещающей среды, скорости насыщающей жидкости, компонент тензора напряжений и давления жидкости. Для численного решения поставленной задачи используется метод комплексирования интегрального преобразования Лагерра по времени с конечно-разностной аппроксимацией по пространственным координатам. Используемый алгоритм решения позволяет эффективно проводить расчёты при моделировании в сложно-построенной пористой среде и исследовать возникающие в таких средах волновые эффекты. Приводятся результаты исследования области дилатансии в пористой среде.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00689), грантом Президента РФ НШ-5666.2014.5 и грантом КН МОН РК (номер гранта 3328/ГФ4).

### **Система Geombox для задания трехмерных областей сложной формы и краевых условий**

*А. В. Молчанов, А. Н. Козырев*

Результатом работы является система геометрического моделирования. Основными возможностями которой является построение базовых геометрических объектов, таких как сфера, ци-

линдр и параллелепипед. А так же теоретико-множественные операции над ними: вычитание, пересечение и объединение. Система позволяет задавать функциональные данные для решаемых задач [1]. Для решения расчетных задач существует возможность для задания и генерации сеточной структуры данных. Первый способ это использование собственного специализированного сеточного строителя в формате задачи. Вторым способом является использование существующую библиотеку генератора тетраэдральных сеток Netgen [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-11-00485).

Список литературы

1. Козырев А. Н., Петухов А. В., Свешников В. М. Численное моделирование 3D интенсивных пучков заряженных частиц на неструктурированных сетках // [Electron. resource]. <http://sourceforge.net/projects/netgen-mesher/>.

### **Моделирование и расчет температурного режима в процессе аккумуляции и регенерации тепла в теплоутилизаторе**

*А. Н. Наимов, Н. Н. Монаркин*

Исследована математическая модель процесса аккумуляции и регенерации тепла в теплоутилизаторе в виде смешанной задачи для системы двух дифференциальных уравнений в частных производных – уравнений конвекции и теплопроводности. В рассматриваемой модели неизвестными являются температуры воздуха и насадки, коэффициенты теплоотдачи воздуха насадке и насадки воздуху. Данная смешанная задача в других работах исследована при заданном постоянном коэффициенте теплоотдачи. Нахождение коэффициента теплоотдачи, исходя из экспериментальных данных и общих теоретических положений, является весьма непростой задачей. Поэтому ставится задача, наряду с температурами воздуха и насадки, находить и коэффициент теплоотдачи, задавая дополнительно граничный температурный режим воздуха на правом конце теплоутилизатора.

Граничный температурный режим воздуха на левом и правом концах теплоутилизатора моделируется системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Параметры, участвующие в данной системе, в конкретных частных случаях подбираются так, чтобы решение системы максимально близко воспроизводило экспериментальные измерения граничного температурного режима. А в общем случае, для подбора параметров предлагается создать обучающую выборку параметров на основе экспериментальных данных, и применять интеллектуальные пакеты нейронных или гибридных систем.

Численно решая систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, находим граничный температурный режим воздуха в процессе аккумуляции и регенерации тепла. Далее, по известному граничному температурному режиму воздуха разрабатывается алгоритм численного расчета неизвестных величин – коэффициента теплоотдачи, зависящего от времени и точки расчета, температуры воздуха и насадки внутри области. Приводятся результаты численных расчетов, и оценивается их соответствие экспериментальным данным.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-04713 А).

### **Исследование методами анализа чувствительности кинетических моделей химических реакций**

*Л. Ф. Нурисламова, И. М. Губайдуллин*

Компьютерное моделирование играет важную роль в понимании сложных химических реакций, при этом качество моделирования напрямую зависит от выбора схемы химических превращений реакции. Использование детальных кинетических схем (включают в себя десятки веществ и сотни стадий) при моделировании процесса существенно для полного и точного описания процессов в широком диапазоне температур и условий. Однако использование таких кинетических схем требует значительных вычислительных затрат. Кинетику реакции можно описать на основе гораздо меньшего числа стадий, не ухудшая при этом качества результатов моделирования в требуемом диапазоне

условий протекания реакции. В настоящей статье предложена методика упрощения математической модели химической реакции за счет сокращения числа стадий и веществ схемы реакции, основанная на анализе чувствительности функционала модели к изменению ее параметров. Представлены результаты анализа для промышленно значимых реакций.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-07-01764).

Список литературы

1. Nurislamova L.F., Stoyanovskaya O.P., Stadnichenko O.A., Gubaidullin I.M., Snytnikov V.N., Novichkova A.V. Few-Step Kinetic Model of Gaseous Autocatalytic Ethane Pyrolysis and Its Evaluation by Means of Uncertainty and Sensitivity Analysis // *Chemical Product and Process Modeling*. 2014. Vol. 9, № 2. P. 143-154.

2. Нурисламова Л. Ф., Губайдуллин И. М. Редукция детальных схем химических превращений окислительных реакций формальдегида и водорода на основании результатов анализа чувствительности математической модели // *Вычислительные методы и программирование*. 2014. Т. 15. С. 685-696.

### **Fast topological shape optimization with boundary elements**

*I. A. Ostanin, D. N. Zorin, A. Yu. Mikhalev, I. V. Oseledets*

Wide class of engineering design tasks can be posed as optimization problems where the shape and topology of an elastic domain are optimized to reduce costs, e.g. global compliance, while satisfying certain constraints, such as volume constraint. We propose an application of a fast 3D boundary element code to the problems of shape and topology optimization. Our algorithm is based on the formalism of topological derivatives. Adaptive tree strategy of sampling of topological derivatives inside the domain, high performance algebraic solver and the analysis of optimization problem in reduced dimensions promise state of the art performance in the problems of engineering optimization. The approach can be applied to various optimization problems, such as minimization of compliance of an elastic structure or minimization of the distance from a current homogenized elasticity tensor of a periodic structure to the desired one. The efficiency of the approach is illustrated with a numerical example.

The project has been partially supported by Russian National Foundation under grant 15-11-00033.

### **Компактные разностные схемы на адаптивных сетках для некоторых одномерных динамических задач**

*В. И. Паасонен*

Данная работа ориентирована на численное моделирование разнообразных нелинейных краевых задач с одной пространственной переменной, точные решения которых содержат узкие зоны больших градиентов (солитоны, сглаженные ступеньки и пр.), мигрирующие во времени, на фоне обширных зон умеренного изменения. Специфика задач состоит в том, что в областях сильного изменения решения требуется довольно детальная сетка и хорошая аппроксимация уравнения, а в зонах умеренного изменения решения такая детальность оказывается избыточной, поэтому применение схем обычного порядка точности на равномерных сетках сопряжено с необходимостью обработки огромных массивов данных.

С целью экономичного решения таких задач предлагается смешанная технология, базирующаяся на нескольких прогрессивных подходах. Это метод компактных аппроксимаций повышенной точности на неравномерной сетке, механизм динамической адаптации сетки к решению, а также интерполяция решения с одной неравномерной сетки на другую с достаточным порядком точности. На этой основе в работе построены и исследованы компактные схемы для уравнения теплопроводности, волнового уравнения, уравнения Шрёдингера и уравнения Гинзбурга – Ландау.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-191) и Российского научного фонда (соглашение № 14-21-00110).

### **Моделирование динамики упругой среды под действием поверхностной и системы внутренних нагрузок**

*А. В. Павлова, М. С. Капустин, И. С. Телятников*

При оценке прочностных свойств фундаментов, сооружений, элементов конструкций важную роль играет распределение давления в зоне контакта. В работе в качестве модели системы фундамент–основание рассмотрена задача о вибрации штампа на поверхности упругого слоя, содержащего систему горизонтально ориентированных жестких включений с заданными на их границе контактными напряжениями. Для осесимметричной постановки использованы подходы [1,2] при построении перемещений упругого основания под действием внутренних нагрузок, расположенных параллельно поверхности слоя. Задача сведена к интегральным уравнениям, решаемым методом фиктивного поглощения.

Получены соотношения для характеристик напряженно-деформированного состояния упругого слоя, рассчитаны напряжения в области его контакта с основанием излучающей плиты.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00132).

Список литературы

1. Vibrations of an elastic half-space with a set of rigid inclusions / O.D. Pryakhina, A.V. Smirnova, A.A. Evdokimov, M.S. Kapustin // *Doklady Physics*. 2003. V. 48(3). P. 142–145.

2. Model of foundation-base system under vibration load / М. Капустин, А. Павлова, С. Рубтсов, И. Телятников // *Communications in Computer and Information Science*. 2014. V. 487. P. 168–173.

### **Оптимизация конечноэлементных сеток для решения трехмерных задач упругости**

*М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, Д. В. Вагин, Ю. И. Кошкина*

Для решения задач упругости существует достаточно большое количество универсальных конечноэлементных (КЭ) пакетов, среди которых одним из наиболее распространенных является пакет ANSYS [1]. Его недостатками является то, что во-первых, процесс построения КЭ сеток зачастую требует существенных вычислительных затрат, нередко сопоставимых с временем работы процедур сборки и решения КЭ СЛАУ, а во-вторых, в нем довольно трудно получить качественные быстроразрезающиеся сетки с мелкими шагами непосредственно возле концентраторов напряжений. В работе предлагается алгоритм построения несогласованных оптимизированных сеток с призматическими, возможно, криволинейными ячейками и алгоритмы построения на них соответствующих КЭ аппроксимаций. Сравнение с пакетом ANSYS показало преимущество предлагаемых алгоритмов как по вычислительным затратам (минимум на порядок), так и по качеству получаемых сеток, определяемому критерием необходимой мелкости ячеек сетки в окрестности концентраторов напряжений и плавностью ее разрежения с учетом ограничения общего количества узлов в сетке.

Работа проводилась в рамках прикладных научных исследований, выполняемых при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.574.21.0118).

Список литературы

1. ANSYS Workbench Verification Manual. Release 15.0, November 2013. ANSYS, Inc. p. 230.

### **Модели роста и взаимодействия деревьев на основе баланса веществ от корней и энергии от кроны**

*А. И. Пестунов, А. М. Федотов*

Задача моделирования роста и взаимодействия деревьев актуальна в связи с необходимостью нахождения оптимальных условий при высадке деревьев и восстановлении растительного покрова и лесов ряда регионов.

В докладе рассматриваются математические модели роста деревьев, построенные на основе балансовых соотношений, в условиях ограничений питательных веществ почвы и энергии света. Для одновременного ограничения питательных веществ почвы и энергии света показано наличие реше-

ний модели для областей начального размера дерева вдвое меньших, либо вдвое больших стационарной равновесной величины радиуса ствола, которая соответствует средней величине взрослых деревьев леса.

Найдены ограничения на применимость модели роста во времени и в соотношении увеличения радиуса ствола.

На основе анализа решений показано, что фрактальная структура кроны и корней дерева является качественной характеристикой процесса роста дерева.

Для взаимодействующих деревьев найдены доли перекрытия корневых систем и зона размещения, при которых деревья могут достигать одинаковых или разных размеров, причём эта зона размещения имеет вид кольца и расположена достаточно близко от первого меньшего дерева.

Список литературы

1. С. Б. Медведев, А. И. Пестунов, И. А. Пестунов, А. М. Федотов. Модели роста и взаимодействия деревьев // Вестник НовосибирГУ, серия Информ. Техн., 2015 (принята к публикации).

### **Моделирование модификации турбулентности в обратном каскаде квазидвумерной турбулентности с химическими реакциями, поддерживаемой внешней силой**

*В. Е. Петров*

Исследуется влияние химических реакций на обратный каскад энергии в квазидвумерной турбулентности, поддерживаемой внешней силой. На основе численно-аналитического анализа математических моделей автора: а) со случайной силой [1] б) со случайной силой и диссипацией энергии (в данной работе) и сравнении с экспериментальными [2] и численными данными других авторов [3], [4], дополняется физический механизм обратного каскада квазидвумерной турбулентности с химическими реакциями, поддерживаемой внешней силой. Выявляются наиболее характерные качественные особенности и окружение спектра обратного каскада, связанные с модификацией турбулентности на малых волновых числах при появлении механизма диссипации энергии на больших масштабах.

Список литературы

1. Петров В. Е. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011, № 4(3), с. 1036-1037.
2. Wells M. G., Clercx H. J. H. and Van Heijst G. J. F. // 2008. Transport and Mixing in Geophysical Flows, Lect. Notes in Phys. 744, P.119-136. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
3. Jaber F. A., James S. // Journal of Scientific Computing. 1999. V.14, № 1. P. 31-72.
4. Beta C., Schneider K., Farge M., Bockhorn H. // Chemical Engineering Science. 2003. V. 58, № 8. P.1463-1477.

### **Алгоритм деконволюции для реконструкции температур с учетом инерционности датчиков в быстропротекающих процессах**

*В. В. Пикалов*

В работе рассмотрены методы решения ряда задач, возникающих при обработке сигналов и изображений в диагностике газовых потоков.

Часто в практике диагностического эксперимента исследователь сталкивается с искажениями, вызванными измеряющей аппаратурой, особенно на пределе ее разрешающей способности. Иногда не аппаратура, а сам исследуемый процесс дает основания для искажения регистрируемых данных, например, при фотографировании быстро перемещающихся. Другой пример искажения данных – это температурные и весовые измерения в аэродинамических трубах. Задачи устранения аппаратной функции прибора чаще всего сводятся к решению интегральных уравнений, обычно – с ядрами типа свертки. Обращение этих уравнений, их решение, называется задачей деконволюции. В работе дан обзор современных методов решения задач деконволюции, в том числе разработанных с участием автора. Особое внимание уделено так называемому методу алгебраической реконструкции (ART). Приводятся результаты численного моделирования на примере задачи коррекции инерцион-



ности датчиков температуры при ограничении временного разрешения термопары и короткого времени протекания процесса.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-04804).

### **Метод обработки интерферограмм для извлечения фазовой информации в диагностике газовых потоков**

*В. В. Пикалов*

В процессе работы над большим числом экспериментальных интерферометрических изображений возникает необходимость устранения шумов и извлечения фазовой информации [1, 2]. В данном обзоре рассмотрены методы устранения искажения интерферограмм, с последующим извлечением фазовых сдвигов по всему двумерному полю изображения. Отмечаются преимущества и недостатки подходов с привлечением решения дифференциального уравнения Пуассона, интегрального преобразования Гильберта, линейных и нелинейных итерационных методов. Особое внимание уделено алгоритму перевода яркости изображений в поле набега фазы, основанному на численной реализации преобразования Гильберта, вэйвлетов Паула и Морле, и на сшивке разрывов гладких функций.

Приводятся результаты исследования некоторых из рассмотренных алгоритмов при моделировании задач томографии неоднородностей показателя преломления в газодинамических и биофизических приложениях, в частности, в интерференционной микроскопии клеток крови с ограниченным углом обзора.

Список литературы

1. Ghiglia D.C., Pritt M.D. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. -New York: Wiley, 1998.
2. Volkov V.V., Zhu Y. Deterministic phase unwrapping in the presence of noise // Opt. Lett. 2003. V. 28, No.22. P. 2156-2158.

### **Инвариантное моделирование теплового движения газа**

*Е. О. Пикмуллина, Ю. А. Чиркунов*

Впервые одно из инвариантных решений подмодели теплового движения газа было использовано для решения задачи о сильном взрыве академиком Л. И. Седовым. В дальнейшем академик Л. В. Овсянников начал исследование подмоделей газовой динамики с помощью предложенной им программы ПОДМОДЕЛИ, в которой подмодель теплового движения газа получила несчастливый номер 13. Специальный выбор массовых лагранжевых переменных позволяет преобразовать систему уравнений теплового движения газа с четырьмя независимыми переменными к эквивалентной ей редуцированной системе с тремя независимыми переменными, описывающей траектории частиц газа при его тепловом движении [1, 2]. С помощью инвариантных подмоделей и формул производства решений исследованы некоторые краевые задачи для этой системы. Тем самым, получено описание траекторий частиц газа при его, вообще говоря, не инвариантном тепловом движении.

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах теплового движения газа в сильно разреженном пространстве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (2014/138, проект № 435), Программы поддержки ведущих научных школ (проект НШ-2133.2014.1).

Список литературы

1. Chirkunov Yu.A. The Conservation Laws and Group Properties of the Equations of Gas Dynamics with Zero Velocity of Sound. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2009. Vol. 73. No. 4. P. 421 – 425.
2. Ю.А. Чиркунов, С.В. Хабиров. Элементы симметричного анализа дифференциальных уравнений механики сплошных сред. – Новосибирск: Издательство НГТУ. 2012. - 659 с.

### **Моделирование собственных колебаний в микроэлектромеханических резонаторах разного типа**

*Д. О. Пиманов, С. И. Фадеев, Э. Г. Косцов*

Данная работа основана на результатах математического моделирования микроэлектромеханических резонаторов, относящихся к микроэлектромеханическим системам (MEMS) — быстро развивающемуся направлению в современной электронной промышленности.

Характерными элементами микрорезонатора являются подвижный и неподвижный электроды, разделённые микрозазором. Неподвижный электрод покрыт слоем диэлектрика. В качестве подвижного электрода с малой массой используется недеформируемая платформа, прикрепленная к упругой балке с жёстко закрепленными концами, упругой балке консольного типа или натянутая плёнка. При запуске резонатора под воздействием электростатического притяжения возникают колебания подвижного электрода, которые затем продолжаются в виде высокочастотных собственных колебаний.

Формулируются начально-краевые задачи для уравнений математической физики, описывающие цилиндрическую форму прогиба упругого элемента. Из сопоставления с результатами численного анализа начально-краевых задач следует, что применение метода Фурье даёт достаточно хорошее приближение для наименьшей частоты собственных колебаний. Тем самым получена важная характеристика микрорезонатора в аналитическом виде.

### **Континуальная и дискретная модель высокопористых сред в приложении к сверхзвуковой аэродинамике**

*Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский, С. Г. Миронов*

В работе представлены результаты численных исследований сверхзвукового обтекания осесимметричного тела с передними проницаемыми вставками из высокопористых ячеистых материалов с использованием как континуальной модели фильтрации воздуха в пористых материалах (закон Дарси-Форхгеймера), так и прямого моделирования течения воздуха в скелете ячеистого материала. При этом сложный пространственный скелет пористого материала формировался как композиция дискретно расположенных колец различного диаметра (дискретная модель) при сохранении значений величины пористости и прозрачности исходного материала. При численном моделировании определены коэффициенты сопротивления, параметры внешнего течения и течения в пористом материале. Результаты расчетов по моделям пористой среды сопоставлены друг с другом и с данными аэродинамического эксперимента, проанализированы преимущества и недостатки этих моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ (Договор № 14.Z50.31.0019) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-08-03867).

### **Модификация функций фазовых проницаемостей для решения задачи двухфазной фильтрации методом суперэлементов**

*К. А. Поташев, А. Б. Мазо*

Сформулирована методика ремасштабирования (апскейлинга) функций относительных фазовых проницаемостей (ОФП), позволяющих минимизировать погрешность аппроксимации фазовых скоростей фильтрации при суперэлементном моделировании разработки нефтяного пласта [1]. Особенностью такого моделирования является выполнение расчетов на крупных неструктурированных сетках с плановыми размерами блоков (суперэлементов, СЭ), сопоставимыми с расстоянием между скважинами (сотни метров). Вертикальный размер СЭ соответствует толщине пласта, состоящего из нескольких слоев (десятьки метров).

Апскейлинг ОФП выполняется на основе решения серии двумерных задач на детальной сетке. Для построения модифицированных функций ОФП (МОФП) предложен специальный вид функциональных зависимостей. Их коэффициенты отыскиваются из решения задачи минимизации функционала отклонений осредненных и аппроксимированных фазовых скоростей на площад-

ках, соответствующих граням СЭ. Рассмотрен случай слоисто-неоднородного пласта. Продемонстрирована эффективность применения МОФП при суперэлементном решении трехмерной задачи двухфазной фильтрации на участке пласта, разрабатываемого системой нагнетательных и добывающих скважин. Выполнено сравнение с методикой апскейлинга ОФП, пренебрегающей вертикальными перетоками между слоями [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства РТ (№ 15-41-02698), BP Exploration (№ 063100027).

Список литературы

1. Мазо А.Б., Поташев К.А., Калинин Е.И., Булыгин Д.В. Моделирование разработки нефтяных месторождений методом суперэлементов // Математическое моделирование. – 2013. – Т. 25, № 8. – С. 51-64.
2. Поташев К.А. Апскейлинг относительных фазовых проницаемостей в несообщающемся слоистом пласте // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2014, Т. 156 (2). – С. 120-134.

### **Полиномы надёжности случайных графов: получение и использование**

*А. С. Родионов*

В докладе обсуждаются вопросы получения и использования полиномов надёжности случайных графов с ненадёжными рёбрами [1]. Для представления полиномов используется вид с наиболее информативными коэффициентами, некоторые из которых можно получать без расчётов либо с минимальными затратами исходя из их смысла, что позволяет существенно ускорить процесс вычислений. Наряду с исследованным автором ранее полиномом надёжности для всетерминальной (all-terminal) связности [2], рассматриваются полиномы для средней вероятности связности пары вершин и среднего размера связной компоненты, содержащей выделенную вершину. Для получения всех полиномов используется единый подход, основанный на методе факторизации по состоянию произвольно выбранного ребра, редукции размерности и получении точных выражений для графов специального вида и графов малой размерности.

В докладе рассматриваются также вопросы применения полиномов надёжности для оценки качества структур сетей различного назначения, проверки возможного изоморфизма графов и решения других задач структурной оптимизации сетей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

Список литературы

1. Colbourn C.J. Some open problems on reliability polynomials // Congr. Numer. 1993. V. 93. P. 187–202.
2. Chari M., Colbourn C.J. Reliability polynomials: a survey // Combin. Inform. Sys. Sci. 1997. V. 22. P. 177-193.
3. Gadyatskaya O., Rodionov A., Rodionova O. Using EDP-polynomials for network structure optimization // Springer Lecture Notes in Computer Science, vol. 5073, Springer, 2008. P. 1061–1077.
4. Родионов А.С. К вопросу ускорения расчёта коэффициентов полинома надёжности случайного графа // Автоматика и телемеханика. №7, 2011, – С. 134-146.

### **Моделирование водородопроницаемости сплавов для мембранного газоразделения**

*Н. И. Родченкова, Ю. В. Заика*

Производство высокочистого водорода необходимо для экологически чистой энергетики и различных химико-технологических процессов. Значительная часть водорода будет производиться за счет конверсии метана, а также его выделения из других углеводородных газов, не вовлеченных в процесс производства энергии. Методом измерения удельной водородопроницаемости исследуются различные сплавы, перспективные для использования в газоразделительных установках. Требуется оценить параметры диффузии и сорбции с тем, чтобы иметь возможность численно моделировать различные сценарии и условия эксплуатации материала.

Модель соответствует методу проницаемости с учетом лишь основных лимитирующих факторов ((де)сорбции, диффузии, захвата водорода ловушками) и информационных возможностей эксперимента. Основой для проведенных математических исследований послужили данные по водородо-

допроницаемости перспективных сплавов [1]. Исследование ориентировано на экспериментальную методику [2], для апробации модели использовались данные по сплавам ванадия и никеля, тантала и ниобия, полученные в Институте металлургии УРО РАН.

В докладе представлены нелинейная модель водородопроницаемости, итерационный метод решения краевой задачи на основе неявных разностных схем и результаты моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 150100744).

Список литературы

1. Dolan M. D. Non-Pd BCC alloy membranes for industrial hydrogen separation // Journal of Membrane Science. 2010. V. 362. P. 12-28.
2. Kojakhmetov S., Sidorov N., Piven V., Sipatov I., Gabis I. and Arinov B. Alloys based on 5 group metals for hydrogen purification membranes // Journal of Alloys and Compounds. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.242>.

### **Спектральный метод решения уравнения Дункана – Мортенсена – Закаи для нестационарных систем диффузионно-скачкообразного типа**

*К. А. Рыбаков*

В работе рассматривается задача оптимальной фильтрации в нестационарных стохастических системах диффузионно-скачкообразного типа. Предполагается, что в системе наблюдения модель объекта наблюдения задается стохастическим дифференциальным уравнением с пуассоновской составляющей, а модель измерительной системы – стохастическим дифференциальным уравнением без пуассоновской составляющей. В рассматриваемой задаче фильтрации, т.е. в задаче оценивания текущего вектора состояния объекта наблюдения по результатам измерений, для нахождения апостериорной плотности вероятности оценки вектора состояния можно применять робастное уравнение Дункана – Мортенсена – Закаи. Для решения этого уравнения построен новый метод на основе спектральной формы математического описания систем управления [1, 2]. Ранее аналогичный метод был предложен для решения задачи оптимальной фильтрации в нестационарных стохастических системах диффузионного типа [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-08-00323-а).

Список литературы

1. Пантелеев А.В., Рыбаков К.А. Прикладной вероятностный анализ нелинейных систем управления спектральным методом. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010.
2. Пантелеев А.В., Рыбаков К.А. Методы и алгоритмы синтеза оптимальных стохастических систем управления при неполной информации. – М.: Изд-во МАИ, 2012.
3. Рыбаков К.А. О решении робастного уравнения Дункана – Мортенсена – Закаи для нестационарных систем // Информационные и телекоммуникационные технологии. 2014. № 22. С. 9–15.

### **The inverse problem in the transport of heat and moisture in the multilayer walling**

*B. Rysbaiuly, T. B. Akishev, A. N. Satybaldina*

Energy Saving rose to the level of state policy in almost all developed countries. One of the areas of energy efficiency is improving and tightening design standards. In connection with this state standards make high demands on thermal protection of buildings. The constructive arrangement of layers should provide normal operation. Here, the humidity of materials of construction must not exceed a certain level. The moisture significantly reduces the physical, mechanical and thermal characteristics of the materials because elevated levels of moisture in the walls can be attributed to a defective condition. Absence at the design stage simulation processes taking place in structures and predict the behavior of structures during their work in real conditions increases heat loss and premature aging structures.

There are widely used method of mathematical modeling of heat and mass transfer in materials for solving this problem. As basis of mathematical modeling are taken interrelated heat and mass transfer equations in the bed [1]. The thermal and hydraulic conductivity characteristics of the materials are

non-linear and they depend on the temperature and moisture in the material in winter. In this case, the experimental method of determining the coefficient of the freezing or thawing of the material becomes a challenging task. Therefore, in this paper we propose an approximate method for calculating heat transfer and hydraulic conductivity characteristics of the freezing or thawing material.

Список литературы

1. Williams, P. J. The frozen earth. Fundamentals of geocryology / P. J. Williams, M. W. Smith. Cambridge : Cambridge University Press, 1991. - 328 p.
2. Rysbaiuly B. Newton's method to solve the problem of heat transfer in the freezing soil. France, Paris, Pensee Journal, Jan 2014, Volume 76, Issue 1, 261-275 pp.

### **Суперкомпьютерное 3D моделирование сейсмических волновых полей в сложнопостроенных средах**

*А. Ф. Сапетина*

Рассматриваются вычислительные технологии решения задач, связанных с моделированием распространения сейсмических волн в неоднородных средах, характерных для вулканических структур, с использованием суперкомпьютерного моделирования в целях создания систем вибро-сейсмического мониторинга сейсмоопасных объектов. В ходе работы созданы параллельные 2D и 3D алгоритмы и программы для различных постановок указанных задач в сложно построенной среде, где 2D модель есть сечение исходной 3D модели различными плоскостями и под разными углами. Решение задач осуществляется на основе явных конечно-разностных схем на сдвинутых сетках и метода поглощающих границ CFS-PML. Проводится сравнение разработанных программ с точки зрения эффективности использования архитектуры современного суперкомпьютера, оснащенного GPU. Масштабируемость алгоритмов исследована с применением методов имитационного моделирования. Проведены численные эксперименты для приближенной модели вулкана Эльбрус. Применение разработанных технологий позволяет эффективнее проводить изучение структуры волнового поля, обусловленного геометрией внутренних границ, уточнение его кинематических и динамических характеристик.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-07-00589).

### **Численное моделирование задач гидродинамической устойчивости пограничного слоя**

*А. Н. Семенов, С. А. Гапонов*

В данной работе задача гидродинамической устойчивости решается эволюционным методом. Данный метод базируется на факте, что любое однородное граничное условие может быть представлено, как сумма волн с различным инкрементом, тогда при численном моделировании по времени мы легко сможем выявлять самую неустойчивую волну на достаточно больших временах. Это является одним из основных достоинств данного метода по сравнению с классическим способом решения задачи, где выявление наиболее неустойчивой волны является достаточно сложной задачей.

Сопоставление результатов с классическим подходом показала надежность предложенной методики. На ее основе получены новые результаты по устойчивости пограничного слоя с вдувом газа через пористую поверхность под различными углами в направлении течения. Было выявлено, что продольный вдув слабо влияет на устойчивость пограничного слоя. Нормальный вдув наоборот приводит к сильной дестабилизации течения. Также в работе были проведены численные моделирования вдува для углов 30, 45 и 60 градусов. Расчеты проводились при числе Маха набегающего потока  $M=2$  и числе Рейнольдса  $Re=1000$ .

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-00866 А).



### **Численное моделирование стационарных неізотермических течений полимерной жидкости по каналам 3D принтера**

*Б. В. Семисалов, А. М. Блохин*

Стремительное развитие современных технологий аддитивного производства изделий (3D печати) с использованием полимерных материалов требует разработки и анализа новых математических моделей, описывающих с высокой степенью достоверности течения растворов и расплавов полимеров в каналах печатающих устройств. В настоящей работе за основу берётся модификация реологической модели Покровского – Виноградова (см. [1,2]), учитывающая температурные воздействия на стенку канала.

Для анализа модели рассмотрены характерные режимы стационарного течения несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости в канале прямоугольного сечения, близкие по своим качественным особенностям к течениям Пуазейля и Куэтта. Поставлена однородная краевая задача Дирихле для квазилинейного уравнения эллиптического типа, описывающая распределение скорости течения жидкости с учётом анизотропии, вязкости, температуропроводности, силы тяжести и других факторов.

Приближённые решения краевой задачи найдены с помощью нелокального алгоритма, основанного на применении приближений без насыщения К.И. Бабенко (см. [3, 4]). Даны оценки точности численного решения. Приведены результаты расчётов различных режимов течения. Получены решения для предельно малых значений ширины канала.

Список литературы

1. Алтухов Ю.А., Гусев А. С., Пышнограй Г.В. Введение в мезоскопическую теорию текучести полимерных систем. Барнаул: АлтГПА, 2012.
2. Блохин А.М., Семисалов Б.В. Стационарное течение несжимаемой вязкоупругой полимерной жидкости в канале с эллиптическим сечением // Сиб. журн. индустр. мат. 2014. Т. XVII, № 4(60). С. 38–47.
3. Бабенко К. И. Основы численного анализа. М.-Ижевск: НИЦ. Регулярная и хаотическая динамика, 2002.
4. Семисалов Б. В. Нелокальный алгоритм поиска решений уравнения Пуассона и его приложения // Выч. мат. и мат. физ. 2014. Т. 54. № 7. С. 1110–1135.

### **Численный анализ деформирования анизотридной цилиндрической оболочки**

*Б. В. Семисалов, С. К. Голушко*

Анизотридные конструкции представляют собой сетчатые оболочки, выполненные из однонаправленного углепластика методом непрерывной автоматической намотки. Такие конструкции обладают повышенными удельными характеристиками жёсткости и прочности и значительными перспективами в области конструирования ракетной и космической техники, летательных и глубоководных аппаратов, зданий и сооружений ответственного назначения [1, 2].

Трудности, связанные с численным моделированием деформирования и начального разрушения анизотридной конструкции, обусловлены анизотрипией свойств углепластика, его нелинейным поведением и разносопротивляемостью растяжению/сжатию, а также наличием в моделях малых параметров.

В работе на основе соотношений пространственной теории упругости и континуального подхода построена модель деформирования анизотридных конструкций, поставлена и решена задача осевого сжатия анизотридной цилиндрической оболочки. Численный анализ задачи проведён на основе методов приближения без насыщения [3, 4]. Такие методы, использующие разложения неизвестных функций в базисе Фурье и базисе, состоящем из полиномов Чебышёва, позволили минимизировать при расчётах объём оперативной памяти и число операций и гарантировать высокую точность решения задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-12032 офм\_м\_2013).

## Список литературы

1. Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И. Анизотридные композитные сетчатые конструкции – разработка и применение к космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. №3. С. 38–50.
2. Голушко С.К., Семисалов Б.В. Численное моделирование деформирования анизотридных конструкций с применением высокоточных схем без насыщения // Математическое моделирование и численные методы. 2015. № 2 (в печати).
3. Бабенко К.И. Основы численного анализа. М.; Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика". 2002.
4. Семисалов Б. В. Нелокальный алгоритм поиска решений уравнения Пуассона и его приложения // Выч. мат. и мат. физ. 2014. Т 54. №7. С. 1110–1135.

**Трехволновый резонанс в сверхзвуковом пространственном пограничном слое**

*Б. В. Смородский, С. А. Гапонов*

Ламинарно-турбулентный переход в пограничных слоях происходит в результате усиления и нелинейного взаимодействия возмущений малой амплитуды. Для исследования указанных взаимодействий в [1] была разработана слабонелинейная теория (СНТ), являющаяся комбинацией асимптотического разложения поля возмущений в ряд по амплитуде и метода усреднений. В рамках СНТ удается объяснить эксперименты по переходу в двумерных дозвуковых пограничных слоях. При этом ведущим механизмом перехода оказывается трехволновое резонансное взаимодействие возмущений.

Исследование нелинейных взаимодействий в трехмерных (3D) сжимаемых пограничных слоях оказывается более сложным в силу наличия нескольких типов неустойчивости и большего разнообразия возможных резонансов. В настоящей работе на основе обобщения подхода [1] проводится моделирование экспериментов по переходу в сверхзвуковом пограничном слое на модели скользящего крыла при числе Маха 2. В рамках СНТ поле возмущений представляется в виде набора взаимодействующих гармонических по времени волн. Нелинейные уравнения для возмущений зависят от свойств потока и параметров возмущения, которые определялись численно путем интегрирования задачи устойчивости для компонент триплета с помощью метода ортогонализаций. После этого интегрируется система амплитудных уравнений. В результате получаем скорости параметрического усиления основных спектральных компонент. В работе представлены результаты параметрических расчетов эффективности трехволнового взаимодействия в субгармонических триплетах волн неустойчивости 3D сверхзвукового пограничного слоя. Проводится сопоставление расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (креды проектов 12-01-00158а, №15-01-00866а).

## Список литературы

1. Zelman M.B., Maslennikova I.I. Tollmien-Schlichting-wave resonant mechanism for subharmonic-type transition // J. Fluid Mech. 1993. Vol.252. P.499-578.

**Параллельный метод частиц-в-ячейках для решения системы уравнений Власова – Пуассона на гибридных суперкомпьютерах**

*Н. В. Снытников, В. А. Вишневков*

Разработан новый параллельный алгоритм для численного решения уравнений звездной динамики (Власова – Пуассона), с помощью которых описывается движение звезд в галактиках или пыли в протопланетных дисках. Алгоритм основан на комбинировании метода частиц в ячейках и метода свертки для вычисления гравитационного потенциала изолированных систем. Используется новый метод декомпозиции области, предназначенный для моделирования нестационарных вращающихся дисков, особенность динамики которых подразумевает возможность многократного перемещения модельных частиц из одной части вычислительной области в противоположную. Был реализован метод динамического перераспределения процессоров, назначаемых для обработки каждой

подобласти, позволивший проводить расчеты на сетке  $1024^3$  с 10 млрд частиц на 1024 процессорных ядрах. Предложена схема реализации этого алгоритма для суперкомпьютеров с традиционной (CPU) и гибридной (NVIDIA GPU и Intel Xeon Phi) архитектурами. Тестовые эксперименты проводились на суперкомпьютерах ССКЦ, МСКЦ и "Ломоносов" (МГУ).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 14-01-31088, 14-01-00392).

### **APM-SQUAD: алгоритм динамического изменения числа частиц для метода частиц-в-ячейках**

*Т. В. Снытникова, В. А. Вшивков, Г. И. Дудникова*

В данной статье представлен новый алгоритм APM-SQuaD (adaptive particle management directed on statistic quantities), основанный на групповых слияниях. Этот алгоритм для динамического изменения числа частиц может быть использован для задач, решаемых методом частиц-в-ячейках.

Уникальной особенностью алгоритма является сохранение статистических показателей координат и скоростей старого и нового наборов частиц. Координаты и скорости нового набора частиц вычисляются с сохранением математического ожидания и матрицы ковариации координат и скоростей старого набора частиц. Таким образом достигаются две цели:

- алгоритм инвариантен относительно пространственной размерности задач;
- сохраняются не только основные моменты первого порядка, импульс и энергия, но и момент импульса и ковариации между скоростями, необходимой для сохранения плотности токов уже для двумерных задач [1].

Тестирование алгоритма проводилось на решении одномерной задачи о распаде произвольного разрыва плотности ионов в неизотермической плазме.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00392).

Список литературы

1. Снытникова Т. В., Дудникова Г. И., Вшивков В. А. Модификация метода частиц в ячейках с использованием адаптивных масс: взаимодействие лазерного импульса с плазмой // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 348-356.

### **Моделирование акустических волн в многомасштабной среде с логарифмически устойчивым распределением параметров**

*О. Н. Соболева*

Распространение волн в сложных неоднородных средах является одной из важных тем научных исследований. Численное решение задачи имеющей вариации параметров на всех масштабах требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому, чтобы учесть мелкие масштабы вариаций параметров используют эффективные параметры и получают эффективные уравнения, решение которых можно получить численно.

Экспериментально доказано, что в сложных неоднородных средах нерегулярность физических параметров резко возрастает, если уменьшается шаг измерения. Пространственное положение мелкомасштабных неоднородностей, как правило, неизвестно точно. Поэтому физические параметры моделируют случайными полями. В этом случае решение эффективных уравнений должно быть близко к решению, усредненному по ансамблю решению первоначальной задачи.

В настоящей работе методом подсеточного моделирования мы получаем эффективные коэффициенты для волнового уравнения, если длина волны много меньше масштаба неоднородностей в изотропной среде, если параметры среды имеют логарифмически устойчивое распределение. Полученные теоретические результаты сравниваются с результатами трехмерного численного моделирования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-01458).

## **Моделирование энергетических систем с обратной связью полиномами Вольтерра**

*С. В. Солодуша*

Статьи [1, 2] посвящены применению полиномов Вольтерра для моделирования нелинейной динамики энергетических систем. В данной работе проведено сопоставление различных методик идентификации полиномов Вольтерра, основанных на введении специальных семейств кусочно-постоянных тестовых входных сигналов, применительно к проблеме автоматического управления нелинейной динамической системой с обратной связью. Приводятся результаты вычислительных экспериментов для эталонных моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-01425а).

Список литературы

1. Suslov K. V., Solodusha S. V., Gerasimov D. O. Modeling of Nonlinear Dynamics of Active Components in Intelligent Electric Power Systems // 4-th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS 2015). Lisbon. 20-22 May 2015.
2. Солодуша С. В. К задаче моделирования динамики теплообменников квадратичными полиномами Вольтерра // Автоматика и телемеханика. 2014. № 1. С. 105-114.

## **Проектирование систем рассеивателей с универсальной диаграммой при различных поляризациях**

*М. С. Сопна*

Рассматривается рассеяние плоской электромагнитной волны на системе цилиндрических импедансных поверхностей. Постановка задачи предполагает, что известны результаты измерений отраженного сигнала некотором наборе точек, включающем полную комплекснозначную величину рассеянного поля, или модуль рассеянного поля или его фазу. Для решения обратной задачи делается переход к интегральным уравнениям. Использование модифицированного граничного условия позволяет свести исходную задачу к нелинейному интегрооператорному уравнению, допускающему эффективную дискретизацию и регуляризацию. Применение функциональных соотношений подобия, полученных при решении обратной задачи при Е- и Н-поляризациях дает возможность синтезировать импедансное покрытие, обеспечивающее диаграмму рассеяния, не меняющуюся при смене поляризации.

## **Анализ динамики давления в теплофизическом эксперименте с помощью преобразования Гильберта – Хуанга**

*В. А. Спиряев, А. А. Левин*

Для изучения процессов взрывного вскипания важно иметь возможность всестороннего анализа основных механизмов парообразования, а также отслеживания эволюции промежуточных явлений. В работе представлены результаты экспериментов по исследованию процесса интенсивного охлаждения высокотемпературного металлического нагревателя в движущемся потоке недогретого до температуры насыщения этанола. В результате опытов были зафиксированы автоколебательные пульсации давления в этаноле при захолаживании нагревателя. Исследование и анализ возникающей динамики давления проводились с помощью модификации преобразования Гильберта – Хуанга [1]. Определены характерные частоты процесса пульсации паровой оболочки и вскипания недогретой жидкости вокруг поверхности перегретой выше температуры Лейденфроста.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-01425а).

Список литературы

1. Torres M. E. et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011. P. 4144-4147.

### **Mathematical modeling of alkane pyrolysis in a wall-less reactor with allowance for laser radiation effects**

*O. A. Stadnichenko, V. N. Snytnikov, Vl. N. Snytnikov, N. S. Masyuk*

A mathematical model is proposed to describe the three-dimensional gas flow dynamics in a reactor for pyrolysis of alkanes to olefins (Snytnikov et al., 2009, 2012, 2014) with allowance for thermal effects of the absorbed laser radiation. The model is intended to explore the possibility of controlling the conversion of reagents using continuous CO<sub>2</sub> laser radiation. The absorption of radiation by ethylene is accompanied by the transformation of radiation energy into thermal energy. The pyrolysis under laser radiation with a power density up to  $2 \cdot 10^3$  W/cm<sup>2</sup> was modeled. The numerical model was developed using the ANSYS Fluent package (Fluent, 2012) with user modules supplemented with a stiff set of ordinary differential equations describing a kinetic scheme of radical chain reactions, and with user modules for refining physicochemical processes. Verification of the mathematical model of gas dynamics with chemical reactions in the reactor without regard to radiation was reported in (Stadnichenko et al., 2014, Nurislamova et al., 2014). The model was devised to explore the possibility of using laser radiation energy with high intensity and limited power for initiation of chemical reactions of alkane pyrolysis at low near-wall temperatures, and upscaling the process to greater weights and sizes of the reactor with the maintained laminar flow regime.

The project has been in part by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 12-08-31095) and under the UNIHEAT project with the Skolkovo Foundation and BP financial support. The work was supported by base budget project V.44.2.11 and the RF Ministry of Education and Science.

#### References

1. ANSYS Fluent, 2012. User Manual, Release 14.5. ANSYS Inc.
2. Nurislamova, L., Stoyanovskaya, O., Stadnichenko, O., Gubaydullin, I., Snytnikov, V. A Reduced Kinetic Scheme of Gaseous Autocatalytic Ethane Pyrolysis and its Evaluation by Means of Uncertainty and Sensitivity Analysis. Chemical Product and Process Modeling. DOI: 10.1515/cppm-2014-0008. 2014.
3. Snytnikov, V. N., Mischenko, T. I., Snytnikov, Vl. N., Chernykh, I. G. A reactor for the study of homogeneous processes using laser radiation energy. Chemical Engineering Journal. 150, 1. pp.231-236. 2009.
4. Snytnikov, V.N., Mishchenko, T.I., Snytnikov, Vl.N., Malykhin, S.E., Avdeev, V.I., Parmon, V.N. Autocatalytic gas-phase dehydrogenation of ethane. Res. Chem. Intermed. DOI 10.1007/s11164-011-0449-x. 2012.
5. Snytnikov, V.N., Mishchenko, T.I., Snytnikov, V.N., Chernykh, I.G. Autocatalytic dehydrogenation of propane. Research on Chemical Intermediates. 40 (1), pp. 345-356. 2014.
6. Stadnichenko, O., Snytnikov, V., Snytnikov, Vl, Mathematical modelling of multicomponent gas flows with energy intensive chemical processes on the example of ethane pyrolysis. Vychislitelnye metody i programmirovaniye (Numerical methods and programming). V.15, №4, pp.658-668, 2014.

### **Разработка прикладного программного обеспечения для численного моделирования теплообмена инженерных сооружений с многолетнемерзлыми основаниями**

*С. П. Степанов, И. К. Сурдитов, А. Н. Цеева, М. В. Васильева, В. И. Васильев*

В работе рассматривается математическая модель, вычислительный алгоритм и прикладное программное обеспечение для расчета процессов тепломассопереноса в многолетнемерзлых грунтах с учетом их геологического строения [1-5]. Разрабатываемое программное обеспечение позволяет строить геометрическую модель, генерировать неструктурированные расчетные сетки, задавать необходимые входные параметры, проводить расчет нестационарного распределения тепла в грунтах с учетом фазового перехода с использованием метода конечных элементов [6] и визуализировать полученные результаты.

#### Список литературы

1. Вабищевич П.Н., Самарский А.А. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториалл УРСС, 2003.
2. Васильев В.И., Максимов А.М., Петров Е.Е., Цыпкин Г.Г. Тепломассоперенос в промерзающих и протаивающих грунтах. – М.: Наука, 1996.
3. Сидняев Н.И., Федотов А.В., Крылов Д.А. Математическое моделирование распределения температурных полей // Математическое моделирование, 2013. Т. 25. N 7. С. 3–27.



4. Pavlova N.V., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems / 9th International conference on Large-Scale Scientific Computations, LSSC 2013; Sozopol, Bulgaria. 3 June 2013. Lecture Notes in Computer Science. Volume 8353 LNCS, 2014, P. 636-643

5. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V., Vasilyev V.I. Mathematical Modeling of Heat transfer problems in the Permafrost / AIP Conference Proceedings, 2014. V. 1629. P. 424–431.

6. Anders Logg, Kent-Andre Mardal, Garth N. Wells Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method. The FEniCS Book. 2011.

### **The burst mode of accretion in massive circumstellar discs: Simulations with smoothed particle hydrodynamics and grid-based gravitational solver**

*O. P. Stoyanovskaya, N. V. Snytnikov, E. I. Vorobyov, A. G. Zhilkin, V. N. Snytnikov*

We present a numerical algorithm for modeling transient phenomena of gravitational gas dynamics applied to simulations of protostellar accretion in gravitationally unstable disks. The algorithm is based on the Smoothed particle hydrodynamics (SPH) combined with a grid-based solver for the Poisson equation. This combination of methods allows treating the formation and long-term migration of high-density clumps in massive gaseous discs with acceptable time-stepping and without introduction of inhomogeneities in the SPH (such as the sink particle technique developed to treat the global disc dynamics when local gravitational collapse take place in the medium [1]). Practically important features of coupling the SPH with the grid-based solver and numerical issues with a large number of SPH neighbors are discussed in the paper. We found that the accretion rate of gas on the central body for self-regulated and fragmenting discs obtained by our numerical algorithm is in good agreement with results of other numerical simulations of protostellar accretion. The existence of the burst mode of accretion first studied with the grid-based code by Vorobyov and Basu 2005 [2] was confirmed using the SPH simulations.

The project has been partially supported by Ministry of Science and Education of Russian Federation, grants RFBR 14-01-31516, 14-01-31088, 15-32-51204, 14-02-00719.

#### References

1. Bate M.R., Bonnell I.A., Price N.M. Modeling accretion in protobinary systems // MNRAS. 1995. V. 277. P. 362-376.
2. Vorobyov E.I., Basu S. The origin of episodic accretion bursts in the early stages of star formation // The Astrophysical Journal. 2005. V. 633. L137-L140.

### **Отечественные достижения в теории переноса излучения и приложениях к природным средам и космическим проектам (к 90-летию со дня рождения Г. И. Марчука, 100-летию В. В. Соболева и памяти Е. С. Кузнецова, В. С. Владимиров)**

*Т. А. Сушкевич*

В 2015 году мировая научная общественность отмечает дни памяти крупнейших ученых, которые стояли у истоков создания великого научного наследия теории переноса излучения в природных и искусственных средах и её приложений в космических проектах, а также в астрофизике, климатологии, метеорологии, дистанционном зондировании Земли, глобальном мониторинге опасных объектов и последствий природных и техногенных катастроф и т.д. Особое место занимают 100-летие со дня рождения академика Виктора Викторовича Соболева (02.09.1915-07.01.1999) и 90-летие со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука (08.06.1925-24.03.2013) – выпускников Ленинградского университета. основополагающими являются работы профессора Евграфа Сергеевича Кузнецова (13.03.1901–17.02.1966), академика Виктора Амазасповича Амбарцумяна (18.09.1908-12.08.1996), академика Василия Сергеевича Владимиров (09.01.1923-03.11.2012), профессора Кусиэля Соломоновича Шифрина (26.07.1918–02.06.2011) и др.

Среди зарубежных ученых следует отметить Нобелевского лауреата Субрахманьяна Чандрасекара (Subrahmanyan Chandrasekhar (19.10.1910 – 21.08.1995)) [1]. Повышенный интерес к научным результатам С. Чандрасекара возник в связи с его монографией «Перенос лучистой энергии», издан-

ной в 1953 году на русском языке под редакцией Е.С. Кузнецова, одного из первых советских специалистов по теории переноса излучения, нейтронов, заряженных частиц и численному решению кинетических уравнений [2].

При подготовке аналитических исторических обзоров [3-5] были изданы препринты [6-8], в которых собраны наиболее значимые публикации по созданию космических и информационных технологий и пионерские издания, содержащие результаты и достижения в области ДЗЗ (более 800 ссылок). Сейчас это воспринимается как история науки.

Исследование проведено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 15-01-00783, 14-01-00197).

#### Список литературы

1. Сушкевич Т.А. Субрахманьян Чандрасекар (к 105-летию со дня рождения) // Земля и Вселенная. 2015. Вып.4.
2. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды / Отв. ред. и составитель Т.А. Сушкевич. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
3. Сушкевич Т.А. О решении задач атмосферной коррекции спутниковой информации // Исслед. Земли из космоса. 1999, № 6. С. 49-66.
4. Sushkevich T.A. Pioneering remote sensing in the USSR. 1. Radiation transfer in the optical wavelength region of the electromagnetic spectrum // International Journal of Remote Sensing. 2008. V.29. P.2585-2597.
5. Sushkevich T.A. Pioneering Remote Sensing in the USSR. 2. Global spherical models of radiation transfer // International Journal of Remote Sensing. 2008. V.29. P.2599-2613.
6. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 2 / Препринт № 52. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
7. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 3 / Препринт № 53. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.
8. Сушкевич Т.А., Максакова С.В. Обзор методов учета земной поверхности и задачах дистанционного зондирования в расчетах радиационного поля Земли – 4 / Препринт № 54. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 1999. 32 с.

### **Численное и аналитическое исследование затухания альфвеновской волны в диссипативной плазме**

*А. А. Таюрский, М. Б. Гавриков*

В докладе изучается затухание альфвеновской волны на базе точного решения двухжидкостных уравнений электромагнитной гидродинамики плазмы (ЭМГД-уравнения), в полном объеме учитывающих инерцию электронов. Проведено исследование временного и пространственного затухания альфвеновской волны, обусловленное диссипативными эффектами, в частности, магнитной и гидродинамическими вязкостями и теплопроводности электронов и ионов, и релаксации температур электронов и ионов в волне, вызванной их упругим взаимодействием, на основе точного решения нелинейных магнитогидродинамических уравнений.

В докладе показано, что анализ временного нелинейного затухания альфвеновской волны сводится к исследованию некоторой нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений на комплексные амплитуды параметров волны. При этом затухание волны распадается на два этапа. На первом этапе происходит быстрая трансформация магнитной и большей части кинетической энергии в тепловую энергию электронов и ионов. На втором этапе происходит значительно более длительная релаксация температур электронов и ионов, при которой в тепловую энергию плазменных компонент переходят остатки кинетической энергии, а магнитная энергия не меняется и имеет фоновое значение.

Для изучения пространственного затухания альфвеновской волны предложена неявная разностная схема решения ЭМГД-уравнений на полупрямой в случае плоской симметрии. В докладе оценивается скорость проникновения альфвеновской волны в плазму, влияние на затухание частоты альфвеновской волны, конкретных типов теплопроводности электронов и электронной вязкости.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-01-03085).

Список литературы

1. Гавриков М.Б., Таюрский А.А. Пространственное нелинейное затухание альфвеновских волн в диссипативной плазме. — Математическое моделирование. № 8, 2013. С. 65-79

### **Эволюция медико-биологического сообщества Новосибирского научного центра**

*И. И. Титов, А. А. Блинов*

Занятие наукой – один из видов социальной активности. При этом взаимодействие учёных реализуется обменом мнений, разделением труда и т.д. и проявляется в увеличении числа и цитируемости публикаций – явного продукта научного сотрудничества. Благодаря большому объёму доступной информации о научных работниках в базах данных публикаций и социальных сетях, сети соавторства научных публикаций являются перспективным объектом для изучения развития социальных систем на всех масштабах организации – на уровне индивида, коллектива и экологической группы, организаций и всей системы в целом.

В первой части доклада мы представляем результаты статистического анализа публикационной активности научных работников из базы данных научных публикаций PubMed. Полученные результаты сравниваются с известными математическими моделями публикационной активности.

Во второй части доклада мы рассматриваем публикационную активность медико-биологического сообщества Новосибирского Научного Центра, построенную по данным PubMed. Особое внимание уделяется автоматическому выделению научных коллективов по данным публикационной активности.

### **Моделирование графеноподобных полупроводниковых наносистем**

*О. А. Ткаченко, В. А. Ткаченко*

Трудным тестом для нанотехнологий является задача превращения двумерного электронного газа (ДЭГ) полупроводниковых гетероструктур в графеноподобную решетку. По условиям формирования ее период (~100 нм) в 500 раз больше, чем у графена, и характерные энергии (<1 мэВ) на 3 порядка ниже, чем в графене и на порядок меньше примесных флуктуаций потенциала, разрушающих минизонный спектр и дираковские особенности. Для сохранения этих явлений предложена и численно оптимизирована нелегированная структура с двумя металлическими затворами: затвор на поверхности полупроводника имеет решетку не совсем одинаковых отверстий (из-за ошибок технологии) и отделен от верхнего затвора тонким диэлектриком. Подстройка затворных напряжений дает под отверстиями требуемые квантовые точки, либо антиточки (барьеры) в ДЭГ, но малый беспорядок возле поверхности передается полем вглубь структуры с усилением из-за разной степени затухания модуляции потенциала на разных длинах волн. Исходя из строения структуры, решались задачи трехмерной электростатики и двумерное уравнение Шредингера для больших квантовых резонаторов в широком электронном волноводе. Проанализирован беспорядок, возникающий в массивах квантовых точек и антиточек, и его влияние на кондактанс. Расчеты выполнены на машине МВС-10П МСЦ РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (гранты 14-22-00143, НШ-2938.2014.8).

### **Численное моделирование динамического поведения вязкоупругих трубопроводов с протекающей жидкостью**

*Ф. Ж. Тураев, Б. А. Худаяров*

На примере вязкоупругой оболочки рассмотрены задачи о нелинейных колебаниях вязкоупругих трубопроводов с протекающей жидкостью. Математическая модель для исследования вязкоупругих цилиндрических оболочек построена на основе теории пологих оболочек Маргерра. При помощи метода Бубнова – Галеркина задача сведена к исследованию системы обыкновенных интегродифференциальных уравнений, где независимой переменной является время. Решение интегро-

дифференциальных уравнений определяются численным методом, основанным на исключении особенности в ядре релаксации интегрального оператора. На основе этого метода разработан алгоритм численного решения задачи и составлен прикладных программ, обеспечивающих решение всей совокупности рассматриваемых задач моделирования. Численно исследовано влияние сингулярности в ядрах наследственности на колебания конструкций, обладающих вязкоупругими свойствами.

### **Численное моделирование двумерного осесимметричного движения газожидкостной смеси в газлифтной скважине**

*А. К. Тураров, Н. М. Темирбеков*

В работе исследуется задача о движении газа и газожидкостной смеси в газлифтных скважинах. В работе [1] исследована одномерная модель газлифтного процесса, где движение в затрубном пространстве и подъемнике описывается уравнениями в частных производных гиперболического типа. Основываясь на этих исследованиях, в данной работе предложена новая двумерная модель, основанная на уравнениях Навье – Стокса в цилиндрических координатах, которая более подробно описывает физические процессы, протекающие в нефтяном пласте. Исходя из принципа работы газлифтной скважины, вычислительная область разделена на три подобласти, в каждой из которых учитываются характеристики соответствующей среды. Предлагается вычислительный алгоритм для численной реализации модели, основанный на применении двухшагового метода Лакса – Вендроффа [2]. Приведены результаты вычислительных экспериментов, проведенных для ряда тестовых задач.

Список литературы

1. Алиев Ф., Гулиев А.П., Ильясов М.Х., Алиев Н.А. Алгоритм решения задачи определения движения пространственного газлифтного процесса. Труды института прикладной математики, Т. 2, №1, 2013. С. 91-98.
2. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен, Т. 1, Мир, 1990, 385 с.

### **Построение сеток в деформированных объемах вращения**

*О. В. Ушакова, Н. А. Артемова, Т. Н. Бронина, А. И. Анучина, В. И. Гордейчук*

В докладе описываются алгоритмы и программы для построения сеток в объемах, полученных деформацией осесимметричных конструкций. Они предназначены для численного моделирования процессов многокомпонентной гидродинамики [1] и созданы в рамках подхода [2] на основе работ [3-9]. Описываемые алгоритмы осуществляют построение структурированных оптимальных сеток (невыврожденных, близких к равномерным и ортогональным сеткам) [2], состоящих из шестигранных ячеек [1]. Предложены алгоритмы для построения сеток в конструкциях, образованных объемами вращения с различными осями вращения, в конструкциях, полученных деформацией объемов вращения осесимметричными объемами вращения, и алгоритмы для консервативной перестройки сеток в указанных конструкциях. Под консервативностью понимается свойство сохранения объема с допустимой точностью при перестройке сеток как локально, так и глобально по всей конструкции. Перестройка сеток осуществляется с целью удовлетворения требований оптимальности. Приводятся примеры расчетов и результаты тестирования построенных сеток на невырожденность и оптимальность по критериям [2, 9].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-01-04146), УрО РАН (код проекта 15-7-1-13).

Список литературы

1. Anuchina N.N., Volkov V.I., Gordeychuk V.A., Es'kov N.S., Pyutina O.S., and Kozyrev O.M. Numerical simulation of 3D multi-component vortex flows by MAH-3 code // Advances in Grid Generation. ed by Ushakova O.V. Novascience Publishers. 2007.
2. Khairullina O.B., Sidorov A.F., and Ushakova O.V. Variational methods of construction of optimal grids // Handbook of Grid Generation. Thompson J.F., Soni B.K., and Weatherill N.P., eds. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 1999. P.36-1-36-25.

3. Бронина Т.Н., Гасилова И.А., Ушакова О.В. Алгоритмы построения трехмерных структурированных сеток // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2003. Т. 43. 6. С. 875-883.
4. Bronina T.N., Ushakova O.V. Application of Optimal Grid Generation Algorithms to the Volumes of Revolution // Advances in Grid Generation. ed. by O.V. Ushakova. Novascience Publishers, 2007.
5. Бронина Т.Н. Алгоритмы построения начальных трехмерных структурированных сеток для областей вращения // Труды института математики и механики. 2008. Т.14. 1. С.3-10.
6. Ушакова О.В. Алгоритмы оптимизации трехмерных сеток для областей вращения // Труды института математики и механики. 2008. Т.14. 1. С.150-180.
7. Ушакова О.В. Классификация шестигранных ячеек // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. 2008. Т.48. 8. С.1426-1428.
8. Прохорова М.Ф. Проблемы гомеоморфизма, возникающие в теории построения сеток // Труды института математики и механики. 2008. Т.14. 1. С.112-129.
9. O.V.Ushakova. Nondegeneracy tests for hexahedral cells // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 200 (2011) 1649-1658.

### **Расчет многослойных элементов конструкции сложной геометрии**

*Л. Р. Фахрутдинов, Д. В. Бережной*

В работе для используемого при однослойном моделировании оболочечной конструкции конечного элемента вводятся изопараметрические аппроксимации геометрии и перемещений. Матрица жесткости вычисляется численно по квадратурной формуле Гаусса – Лежандра, в каждой квадратурной точке вводится статическая гипотеза, обычно используемая для оболочек средней толщины, об отсутствии влияния поперечного напряжения на мембранные, изгибные и деформации поперечного сдвига [1]. Для устранения эффекта заклинивания предполагается использование метода двойной аппроксимации по точкам суперсходимости. Для иллюстрации приведены некоторые результаты статического расчета гондолы легкомоторного самолета.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 15-41-02555, 15-41-02557).

Список литературы

1. Бережной Д.В., Сагдатуллин М.К. Трехмерный конечный элемент для расчета оболочек средней толщины // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 9. С. 256-261.

### **Анализ подходов к численному решению НЛД-уравнений гидродинамики**

*З. И. Федотова, Г. С. Хакимзянов*

Численные методы решения нелинейно-дисперсионных (НЛД-) уравнений гидродинамики получили стимул к развитию, когда были построены дифференциальные модели, отвечающие запросам инженерной практики, требовавшей учета реальной конфигурации водных бассейнов и уточненного прогнозирования процессов распространения волн с учетом дисперсионных эффектов. В статье [1], опубликованной почти полвека назад, выведены первые 2D-модели со слабо-нелинейной дисперсией для случая произвольной донной поверхности. С этого времени возник устойчивый интерес к выводу различных вариантов НЛД-моделей и соответствующих алгоритмов их численной реализации. Однако исследованию и верификации численных методов уделялось недостаточное внимание (в качестве исключения можно сослаться на [2]).

В настоящей работе проанализированы сложившиеся подходы к построению конечно-разностных алгоритмов для иерархии НЛД-моделей [3]. За основу взяты уравнения базовой НЛД-модели [4], что обеспечило возможность изучать и оценивать численные методики на основе единообразного подхода. Полученные результаты полезны при поиске путей повышения эффективности численного моделирования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-17-00219), а также в рамках программы Государственной поддержки научных школ РФ (грант НШ-5006-2014-9).

Список литературы

1. Peregrine D.H. Long waves on a beach // J. Fluid Mech. 1967. V. 27, pt. 4. P. 815-827.



2. Хахимзянов Г.С., Шокин Ю.И., Барахнин В.Б., Шокина Н.Ю. Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001.
3. Shokin Yu.I., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Hierarchy of nonlinear models of the hydrodynamics of long surface waves // Doklady Physics. 2015. V. 60, No. 5. P. 224–228.
4. Федотова З.И., Хахимзянов Г.С. Базовая нелинейно-дисперсионная модель гидродинамики длинных поверхностных волн // Вычисл. технологии. 2014. Т. 19, № 6. С. 77–93.

### **Модель производственной мощности подземных рудников ОАО "УГОК"**

*М. С. Фокина*

Задача планирования воспроизводства мощности горнодобывающего предприятия является многоплановой и сводится к оптимизации всего комплекса горно-подготовительных работ, обеспечивающего соблюдение договорных условий объемов добычи меди с учетом проявления возможных неблагоприятных факторов производственной сферы, именуемых факторами риска. Критерием оптимизации указанной программы могут быть предельные издержки, а инструментом управления программой – вероятностные сетевые модели.

В экономической литературе широко освещены методы оптимизации горнопроходческих работ при строительстве и реконструкции шахт, подготовки новых горизонтов на основе использования сетевых моделей с детерминированными и вероятностными оценками продолжительности сооружения отдельных горных выработок.

В данной статье приводится модель определения производственных запасов. По имеющимся данным определены производственные запасы для двух подземных рудников ОАО "УГОК".

По данной модели получили, что остаточный объем производства двух основных рудников ОАО "УГОК" составляет 160 млн тонн руды.

Список литературы

1. Ломкова, Е.Н. Экономико-математические модели управления производством: учебное пособие / Е.Н.Ломкова, А.А.Эпов. – Волгоград: РПК "Политехник", 2005 г.
2. Учалинский ГОК. Официальный сайт. [Electron. resource]. <http://ugok.ru>

### **Возбуждение плазмонов неоднородными волнами: моделирование методом граничных элементов**

*Л. Л. Фруммин, Д. А. Шапиро*

Методом граничных элементов проведено моделирование двумерных задач рассеяния неоднородных волн на диэлектрических и металлических цилиндрах и решетке цилиндров, размещенных вблизи границы раздела между двумя диэлектрическими средами [1,2]. В расчетах применена специальная составная функция Грина для уравнения Гельмгольца в слоистых средах, позволяющая исключить дискретизацию бесконечной границы между средами и учесть многократные отражения волн между цилиндрами и границей раздела (подложкой). С помощью теоремы Флоке метод расчета распространен на случай бесконечной периодической решетки цилиндров. Неоднородная волна возникает при падении плоской волны на границу раздела вблизи угла полного отражения. В ходе численного моделирования рассеяния неоднородных волн обнаружено возбуждение плазмонов, локализованных в узких щелях между двумя металлическими цилиндрами, а также в щелях периодической решетки металлических нанопроволок, лежащих на диэлектрической подложке. Расчеты показали, что амплитуда плазмонного резонанса сильно зависит от угла падения, что позволяет оптически управлять амплитудой и положением резонанса.

Работа поддержана Программой Правительства Российской Федерации поддержки ведущих научных школ НШ 4373.2014.2.

Список литературы

1. L.L. Frumin, A.V. Nemykin, S.V. Perminov, and D.A. Shapiro. Plasmons excited by an evanescent wave in a periodic array of nanowires. Journal of Optics. 2013. V. 15(8) P. 085002.
2. L.L. Frumin, S.V. Perminov, and D.A. Shapiro. Plasmons excited by an evanescent wave // Journal of Optical Society of America, B. 2013. V. 30(8)/ P. 2048-2052.

### **Трехмерное моделирование притока жидкости к горизонтальной скважине с многостадийным гидравлическим разрывом пласта**

*М. Р. Хамидуллин, А. Б. Мазо, К. А. Потапьев*

В данной работе предлагается трехмерная фильтрационная модель притока однофазной жидкости к горизонтальной скважине, пересеченной трещинами многостадийного гидравлического разрыва пласта (МГРП). Модель учитывает фильтрацию флюида в коллекторе и трещинах гидроразрыва.

Рассматривается стационарная задача притока жидкости к горизонтальной скважине с многостадийным гидроразрывом пласта в предположении, что толщина однородного пласта постоянна, кровля и подошва непроницаемы. Скважина проходит по центру пласта, ее ось параллельна кровле и подошве. Трещины многостадийного гидроразрыва являются ортогональными к оси скважины параллелепипедами с постоянной проницаемостью. Расстояние между соседними трещинами одинаково. Значения давления на скважине и на контуре питания считаются постоянными.

Предлагается как численная схема решения задачи, так и приближенная аналитическая формула оценки дебита горизонтальной скважины с многостадийным гидроразрывом пласта. Приводится сравнение с другими аналитическими оценками для дебита горизонтальной скважины с МГРП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Республики Татарстан (№ 15-41-02698, № 15-41-02699), а также BP Exploration Company (№ С175-13).

### **Интеграл Бернулли для уравнений двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению**

*А. Э. Холмурадов*

Данная работа основана на двухскоростной модели равновесной по давлению в фазах. Уравнение Даниила Бернулли, полученное в 1738 г., является фундаментальным уравнением гидродинамики. Оно дает связь между давлением, средней скоростью и пьезометрической высотой в различных сечениях потока и выражает закон сохранения энергии движущейся жидкости. С помощью этого уравнения решается большой круг задач. В работе получены аналоги интегралов Бернулли для рассматриваемой модели двухфазных сред с одним давлением. Показано, что при совпадении скоростей и физических плотностей фаз уравнение переходит в известное уравнение Бернулли для потенциальных течений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Комитета по координации развития науки и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан (номер гранта А-13-18).

### **Трехмерное моделирование спрединга и субдукции в сферических переменных**

*В. В. Червов*

С применением трехмерной численной модели конвекции в мантии Земли, основанной на системе уравнений Навье – Стокса в приближении Обербека – Буссинеска и геодинамическом приближении, построены численные модели погружения литосферной плиты под континент.

Рассматриваются два варианта развития термодинамического следа, характеристики которого можно отождествить с погружающейся в мантию плитой (слэб).

В первом варианте слэб возникает как следствие раздвижения океанических плит, одна из которых имеет "скользящую" границу с неподвижным континентом. Во втором варианте микроконтинент движется с некоторой скоростью от срединно-океанического хребта (СОХ), наезжая на пассивную тонкую литосферную плиту.

Условия для задач ставятся на основании естественных значений, наблюдаемых на поверхности планеты.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта фундаментальных исследований СО РАН № 20 "Глубинные источники вулканизма в зонах субдукции".

### **Вероятностная модель нелинейного процесса**

*Д. М. Черенков, С. В. Зуев*

Дается описание модели динамической системы в терминах вероятности нахождения системы в определенном состоянии. Такое описание может оказаться полезным в задачах прогнозирования и обеспечения безопасности там, где система имеет нелинейную природу и, в особенности, в случае наличия динамического хаоса.

Рассматривается динамическая система, описываемая дифференциальным уравнением  $y' = Q(y, t)$ . Предполагается, что единственная наблюдаемая  $y(t)$  этой системы измеряется прибором, точность которого равна  $b/2$ , а также время измеряется с некоторой погрешностью  $a/2$ . Рассматривается случай отсутствия особых точек вблизи начального и конечного состояний системы.

В этих предположениях строится вероятностная модель поведения системы: вычисляется вероятность для системы быть в окрестности точки  $(y_1, t_1)$ , если в начале система была в окрестности точки  $(y_0, t_0)$ .

### **Динамика локальных областей турбулентности в условиях фоновых возмущений гидрофизических полей**

*Г. Г. Черных, О. Ф. Воропаева*

Построены численные модели и выполнено исследование динамики плоской локализованной зоны турбулентного смешения и генерируемых ею внутренних волн в устойчиво стратифицированной среде. Модели основаны на двумерной системе осредненных уравнений гидродинамики в приближении Обербека – Буссинеска, замкнутой как с использованием дифференциальных уравнений переноса рейнольдсовых напряжений, так и алгебраических аппроксимаций этих величин. Построена численная модель взаимодействия зоны турбулентного смешения и локального возмущения поля плотности в пикноклине. Численное моделирование течения осуществлено в широком диапазоне параметров локального возмущения поля плотности. Получено, что генерируемое локальным возмущением поля плотности течение может приводить к существенному порождению энергии турбулентности в зоне турбулентного смешения и увеличению времени ее “жизни”. Выполнено численное моделирование эволюции зоны турбулентного смешения в горизонтально однородном сдвиговом потоке линейно стратифицированной среды. Полученные данные демонстрируют трансформацию области турбулентных возмущений и генерируемых ею внутренних волн под воздействием сдвигового потока, а также существенное порождение энергии турбулентности осредненным движением, приводящее к замедлению вырождения турбулентности при больших значениях времени вырождения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00246).

### **Моделирование геолого-технических мероприятий методом трубок тока**

*А. Г. Чечинова, К. А. Поташев*

Для описания фильтрационных течений в нефтяном пласте традиционно используются полномасштабные трехмерные модели. В случае крупных месторождений их расчетные сетки могут насчитывать миллионы узлов, поэтому при оценке эффективности геолого-технических мероприятий обычно переходят к секторным моделям участков, содержащим небольшое количество скважин. Тем не менее, размеры расчетных блоков сетки остаются слишком крупными для детального описания процессов.

Эффективным методом моделирования геолого-технических мероприятий представляется метод трубок тока, который при понижении размерности решаемой задачи позволяет существенно повысить детальность расчетной сетки при схожем объеме вычислительных затрат.

В настоящей работе представлены результаты исследований по первому этапу – разработке способа численного выделения трубок тока в системе взаимодействующих скважин в неоднородном пласте по дискретному полю давления, найденному при решении плоской задачи. Сформулирован алгоритм построения траектории основной линии тока и оценки переменной толщины трубки тока.

Калибровка параметров предложенного алгоритма и оценка его точности проведена на основе серии расчетов с известным аналитическим решением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительство РФ (№ 15-41-02699), British Petroleum Exploration (№ 063100027).

### **Математическое моделирование синтеза алкилметилового эфира и алкилметилкарбоната в присутствии комплекса Co**

*А. Ф. Шайхнурова, К. Ф. Коледина, С. Н. Коледин*

В данной работе строится математическое описание реакций метилирования и карбоксиметилирования спиртов, с помощью реагента "зеленой химии" диметилкарбоната в присутствии комплекса Co, которое, впоследствии, может использоваться для разработки высокоэффективных и селективнодействующих металлокомплексных катализаторов [1].

"Зеленая химия" – это новое направление в химии, главная цель которого состоит в предотвращении загрязнения окружающей среды вредными веществами [2]. Изучив литературный обзор по проблематике "зеленой химии", а также натурные (химические) экспериментальные работы в этой области можно сделать вывод, что до сих пор не существует достаточно разработанных схем химических превращений, на основе которых можно было решить оптимизационные задачи, с целью получения экологически чистых продуктов, без вредных побочных продуктов. Поэтому данная тематика является актуальной и перспективной для изучения.

Список литературы

1. Хуснутдинов Р.И., Щаднева Н.А., Маякова Ю.Ю. Синтез алкилметилового эфира и алкилметилкарбоната при взаимодействии спиртов с диметилкарбонатом в присутствии комплексов W и Co. // ЖОРХ, 2014, 50(6), 808-813.
2. Арико Ф., Тундо П. Диметилкарбонат – современный "зеленый" реагент и растворитель // Успехи химии. – 2010. – Т. 79. – №. 6. – С. 532-543.

### **Математическое моделирование процессов дегидрирования углеводородов в каталитических мембранных реакторах**

*Е. В. Шелепова, А. А. Ведягин, И. В. Мишаков, А. С. Носков*

Процессы дегидрирования углеводородов широко используются на практике. Однако традиционные процессы дегидрирования характеризуются жесткими термодинамическими ограничениями. Окислительное дегидрирование характеризуется низкой селективностью по целевому продукту. Проведение процессов дегидрирования в каталитических реакторах с использованием водородпроницаемых мембран позволит увеличить конверсию углеводородов за счет отвода водорода из реакционного объема, тем самым сместив равновесие реакции дегидрирования в сторону образования продуктов.

В работе представлено математическое моделирование процессов дегидрирования углеводородов в каталитическом мембранном реакторе для двух типов мембран: плотной и пористой. Была проведена верификация математической модели мембранного реактора на примере процесса дегидрирования этана. Для решения системы уравнений в частных производных при переходе к дискретному аналогу использовали интегро-интерполяционный метод, а также метод прямых, не аппроксимируя производные по длине. Система ДУЧП была сведена к системе ОДУ по длине для узловых значений по радиусу реактора, которую решали с помощью полунявного метода типа Розенброка 2-го порядка точности с автоматическим выбором шага интегрирования. Разработанная модель позволила провести оптимизацию ряда параметров, которые влияют на такие показатели процесса дегидрирования, как конверсия углеводородов и селективность по целевым продуктам реакции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Академии Наук (V.45.3.2).

### **Математическое и численное моделирование газодинамических процессов в композиционном материале при отверждении**

*Ю. В. Шпакова, И. О. Богданов, Ю. И. Димитриенко, С. В. Сборщиков*

В данной работе представлена математическая модель решения задачи фильтрации жидкого связующего в тканевом композиционном материале при RTM методе изготовления.

Для решения задачи используется совместное решение макро-задачи тепломассопереноса в конструкции [1] с учетом кинетики отверждения и микрозадачи для учета гидродинамики движения связующего в пористом каркасе [2]. Для численного моделирования локальной задачи фильтрации использован метод асимптотического осреднения в сочетании с методом конечных элементов. Представленные результаты численного моделирования процесса фильтрации жидкого связующего в тканевом материале позволили выявить характерные особенности движения жидкого связующего.

Исследование газодинамических процессов в дальнейшем используется при решении макро-задачи для выбора оптимального температурного режима пропитки пористого каркаса композиционного материала. Это позволит снизить пористость композиционного материала и повысить его прочностные свойства [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-4811.2014.8.

Список литературы

1. Димитриенко Ю. И., Коряков М. Н., Балакшин А. И. Моделирование нестационарного внутреннего тепломассопереноса в теплозащитных конструкциях на основе трехмерного конечно-элементного анализа // Наука и образование. Электронный журнал.- # 10, октябрь 2013 DOI: 10.7463/1013.0606069.

2. Димитриенко Ю.И., Левина А.И., Галицын А. Конечно-элементный анализ локальных газодинамических процессов в трехмерных пористых структурах// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. № SPEC.-2011.-С.50-66.

3. Димитриенко Ю. И., Соколов А. П., Шпакова Ю. В., Юрин Ю. В. Моделирование поверхностей прочности композитов на основе микроструктурного конечно-элементного анализа // Наука и образование. Электронный журнал.- # 11, ноябрь 2012.-DOI: 10.7463/1112.0496336.

### **Новые подходы в обработке данных лазерного сканирования автомобильных дорог**

*Э. А. Эшаров, Б. М. Шумилов*

В работе будет представлено решение задачи синтеза поверхностей автомобильных дорог по материалам лазерного сканирования на основе метода срединных траекторий [1] и параметрической идентификации нелинейных дифференциальных уравнений [2]. Для построения динамических моделей закономерностей поведения отдельных показателей используются рекуррентные сплайны [3, 4]. Рассматривается задача разработки методов восстановления нелинейных дифференциальных уравнений, моделирующих динамическую систему, по наблюдаемым реализациям ее переменных на основе применения сплайн-вейвлетов для анализа и обработки численных данных лазерных измерений [5].

Список литературы

1. Марчук Г.И. Математические модели в иммунологии. Вычислительные методы и эксперименты. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1991.

2. Константинова Л.И., Кочегуров В.А., Шумилов Б.М., Параметрическая идентификация нелинейных дифференциальных уравнений на основе сплайн-схем, точных на многочленах // Автоматика и телемеханика, 1997. № 5. С. 53-63.

3. Эшаров Э.А., Шумилов Б.М., Аркабаев Н.К. Построение и оптимизация прогнозов на основе рекуррентных сплайнов первой степени // Сибирский журнал вычислительной математики. 2010. Т. 13. №2. С. 227-241.

4. Esharov E., Shumilov B. Processing of materials of laser scanning of roads on the basis of recursive cubic splines // in International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering (15-17 October 2014, Tomsk, Russia) / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 71 (2015) 012046.

5. Кудуев А.Ж., Эшаров Э.А., Аркабаев Н.К. Визуализация данных лазерного сканирования автомобильных дорог с использованием ортогонального GNM-мультивейвлет-преобразования // Вестник ТГАСУ. 2014. № 2. С. 157-167.



### **Моделирование неустойчивости и турбулентности при обрушении подветренных волн над препятствием в стратифицированном течении**

*С. Н. Яковенко*

Течение с обрушением внутренних волн, генерируемых препятствием в устойчиво стратифицированном течении, исследовано при помощи DNS/LES при достаточном разрешении сетки для воспроизведения мелкомасштабных процессов перехода и развитой турбулентности [1, 2]. Для моделирования течения применены уравнения Навье – Стокса в приближении Буссинеска и уравнение для отклонения плотности. В методе LES использована модель типа Смагоринского. Условия прилипания и нулевого потока массы на поверхности "холма" заданы неявно при помощи дополнительного члена сопротивления [1]. Для предотвращения искажения потока около "холма" внутренними волнами, отраженными от границ расчетной области, введены специально сконструированные поглощающие слои. Полученные результаты моделирования проливают свет на механизмы возникновения и поддержания геофизической турбулентности.

Список литературы

1. Yakovenko S.N., Thomas T.G., Castro I.P. A turbulent patch arising from a breaking internal wave // J. Fluid Mech. 2011. V. 677. P. 103-133.
2. Yakovenko S.N., Thomas T.G., Castro I.P. Transition through Rayleigh–Taylor instabilities in a breaking internal lee wave // J. Fluid Mech. 2014. V. 760. P. 466-493.

### **Моделирование эволюции поверхности раздела сред в задаче неустойчивости Рэлея – Тейлора**

*С. Н. Яковенко*

Эволюция поверхности раздела несмешивающихся сред исследована [1, 2] путем решения уравнений Навье – Стокса и уравнения для функции объемной фракции, с использованием континуальной модели силы поверхностного натяжения. Плавное изменение сглаженной функции объемной фракции поперек поверхности раздела происходит за счет свертки исходной функции со сглаживающей функцией ядра в виде полинома восьмого порядка, которая сформулирована для плоских двумерных течений, ограниченных стенкой или плоскостью симметрии. Выполнено моделирование развития неустойчивости Рэлея – Тейлора при различных величинах перепада плотности сред и поверхностного натяжения. Для реальных сред (вода – бензол, вода – воздух) хорошо воспроизводятся данные теории и опыта на этапах линейной и нелинейной устойчивости. Данные моделирования подтверждают и уточняют результаты предшественников.

Список литературы

1. Yakovenko S.N., Chang K.C. Application of continuum surface force model to Rayleigh–Taylor instability problem // Thermophysics and Aeromechanics. 2011. V. 18. P. 433-446.
2. Яковенко С.Н. Влияние перепада плотности и поверхностного натяжения на поверхности раздела текучих сред на развитие неустойчивости Рэлея – Тейлора // МЖГ. 2014. № 6. С. 54-69.

## **Секция 10. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ИММУНОЛОГИЯ, БИОЛОГИЯ И МЕДИЦИНА**

### **Молекулярно-динамическая модель для оценки влияния мутаций в белке на фенотипические признаки организма**

*Н. А. Алемасов, Н. В. Иванисенко, В. А. Иванисенко*

Одной из причин такого неизлечимого нейродегенеративного заболевания как боковой амиотрофический склероз является мутация в гене *SOD1*, кодирующем белок SOD1 [1]. Если в SOD1 возникает мутация, то он может образовывать внутриклеточные агрегаты, которые приводят к болезни. Ранее была обнаружена слабая отрицательная корреляция стабильности мутантов SOD1 и времени жизни пациентов с данными мутациями [2]. Нами выдвинута гипотеза о том, что не только дестабилизация, но и локальная стабилизация структуры может вызывать агрегацию.

В рамках настоящей работы с помощью метода молекулярной динамики получены структурно-динамические характеристики белка SOD1 дикого типа и 38 его мутантов. Построены регрессионные модели, связывающие некоторые параметры белка и продолжительность жизни пациентов с мутациями в SOD1 ( $R > 0.6$ ,  $p < 0.001$ ). Сделаны предсказания для мутаций, о которых нет соответствующих сведений в литературе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-44-00123).

Список литературы

1. Bosco D.A. et al. Wild-type and mutant SOD1 share an aberrant conformation and a common pathogenic pathway in ALS. // *Nature Neuroscience*. 2010. V. 13. iss. 11. P. 1396-1403.
2. Byström R. et al. SOD1 mutations targeting surface hydrogen bonds promote amyotrophic lateral sclerosis without reducing apo-state stability // *J. Biol. Chem.* 2010. V. 285. iss. 25. P. 19544-19552.

### **Моделирование процесса репродукции вируса**

*В. С. Антюфеев*

Рассматривается упрощенная модель процессов молекулярно-генетических взаимодействий, происходящих при репродукции вируса гепатита С в клетке. Разработаны математические модели и алгоритмы метода Монте – Карло для компьютерного моделирования упрощенного процесса.

Математическое моделирование позволяет вычислить распределение концентраций компонент процесса в заданный момент времени, Для случая, когда скорости реакций не зависят от концентраций реагентов, получен метод точного вычисления асимптотического распределения этих концентраций.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-01-00441).

Список литературы

1. Kemeny J., Snell J. Finite Markov chains. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1960.

### **Ассоциированные с ожирением потенциальные SNP-маркеры RS200487063, RS34104384 и RS201381696 изменяют средство ТАТА-связывающего белка к промотору гена LEP человека**

*О. В. Аркова, Д. А. Рассказов., И. А. Драчкова., П. М. Пономаренко, Т. В. Аришинова, М. П. Пономаренко, Л. К. Савинкова, Н. А. Колчанов*

Учет SNP-маркеров (Single Nucleotide Polymorphism, SNP) позволяет врачам облегчить страдания пациентов и улучшить их лечение. Установить SNP-маркер может только врач, генотипируя пациентов в рамках лечебной практики и находя у них достоверно частые SNPs в сравнении с нормой. Анализ *in silico* сотен миллионов SNPs “1000 геномов” может ускорить врачам поиск необходимых

им SNP-маркеров. В случаях всех неаннотированных SNPs района [-70; -20] промотора гена LEP человека куда проектируются все доказанные ТАТА-боксы, мы оценили, <http://beehive.bionet.nsc.ru/cgi-bin/mgs/tatascan/start.pl>, значимость (Z-score) изменение сродства ТАТА-связывающего белка (ТВР) к этому промотору, определяющее отличие у пациента от нормы уровня гормона жировой ткани лептина, регулятора энергетического обмена и одного из факторов патогенеза сахарного диабета 2-го типа. В итоге мы нашли потенциальный SNP-маркер rs201381696 дефицита лептина, который был недавно клинически ассоциирован с устойчивостью к лептину/инсулину при ожирении, вызываемом диетой. Также мы нашли два потенциальных SNP-маркера rs200487063 и rs34104384 избытка лептина у пациента, что клинически связано с гипертонией, вызываемой ожирением. Используя экспериментальный метод EMSA (Electrophoretic Mobility Shift Assay, EMSA) в неравновесных условиях *in vitro* мы подтвердили достоверность ( $p < 0.05$ ) различия сродства ТВР к минорным и анцестральному вариантам rs200487063, rs201381696 и rs34104384, а также измерили величины времени полураспада и констант скоростей формирования ( $k_a$ ) и распада ( $k_d$ ) всех вариантов комплексов ТВР/ДНК для этих SNPs. Наконец, для rs566757746, rs560478489 и rs545535648 мы показали *in silico* их незначимое влияние на анкерный комплекс ТВР/ДНК, связывание РНК-полимеразы II с которым запускает сборку преинициаторного комплекса транскрипции гена LEP человека. В рамках существующих знаний, выбор врачами rs200487063, rs201381696, и/или rs34104384 с целью их проверки в качестве obesity-related SNP-маркеров по медико-генетическим стандартам и протоколам мог бы быть более обоснованным, чем выбор остальных SNPs rs566757746, rs560478489 или rs545535648 в промоторе этого гена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-04-00485 (ОА, ТА, МП, ЛС)), Российского научного фонда 14-24-00123 (ДР), проекты VI.58.1.2 (ИД) и VI.61.1.2 (НК).

### **Microtubule aging and effect of microtubule targeted agents**

*A. M. Barlukova, F. Hubert, S. Honoré*

Microtubules (MTs) are long tube polymers of tubulin, found throughout the cytoplasm. They are characterized by dynamic instabilities involved in a number of cellular processes, including cell division and migration. Microtubule-targeted drugs induce perturbation in their instabilities making them attractive for anti-cancer therapies.

Recent studies as [1] show that MTs age might play a crucial role in the effects of microtubule targeted drugs on MT instabilities. The aim of this work is to improve modeling of MT instability by introducing phenomenon of aging of MTs.

We propose a new deterministic mathematical model inspired by the work of P. Hinow et al. [2] to simulate the behavior of a MT population with presence of stabilizing and destabilizing drugs. The model couples transport equations with ordinary differential equations (ODE) with nonlocal terms endowed with suitable boundary conditions for both catastrophe and rescue. The mathematical model takes into account results of biological observations provided by the pharmacologist of our interdisciplinary research group[3].

New model allows us to demonstrate the pharmacological action of some anti-microtubule drugs on MT population through their influence on MT "aging" and, thus, on MT instabilities. Numerical results are in a good agreement with biological observations.

The project has been partially supported by the A\*MIDEX project (n° ANR-11-IDEX-0001-02) funded by the "Investissements d'Avenir" French Government program, managed by the French National Research Agency (ANR) and the support of Plan Cancer 2014, INSERM.

#### References

1. M.K. Gardner, M. Zanic, C. Gell, V. Bormuth, J. Howard. Depolymerizing Kinesins Kip3 and MCAK Shape Cellular Microtubule Architecture by Differential Control of Catastrophe. *Cell* 147, 1092–1103, November 23, 2011.
2. P. Hinow, V. Rezanja, J.A. Tuzszynski. Continuous model for microtubule dynamics with catastrophe, rescue, and nucleation processes. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys.* 80 (3 Pt 1): 031904, 2009.

3. S. Honoré, D. Braguer. Investigating microtubule dynamic instability using microtubule-targeting agents. *Methods Mol. Biol.* 777:245-60, 2011.

### **Компьютерное моделирование процесса самоорганизации белков MinDE во время роста и деления клетки**

*А. А. Витвицкий*

Система белков MinCDE присутствует в бактериях *E. coli* и предотвращает неправильное деление клетки [1]. Механизмы этого взаимодействия до сих пор не до конца ясны, а их моделирование затруднено тем, что классические инструменты, используемые в таких моделях, обладают слабой эффективностью в задачах с динамикой структуры моделируемой поверхности. В этой работе предлагается метод построения трехмерной неоднородной сетки, позволяющий имитировать различные формы поверхности бактериальных клеток и моделировать их динамику (т.е. клеточный рост и деление). На основе предложенного метода разработана клеточно-автоматная модель процесса самоорганизации белков MinDE в бактериях *E. coli*. В отличие от существующих моделей [2], предлагаемая модель позволяет имитировать рост и деление клетки во время самоорганизации белков, что позволяет изучать двустороннюю связь между этими процессами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-31425 mol\_a).

Список литературы

1. Lutkenhaus J. Assembly dynamics of the bacterial MinCDE system and spatial regulation of the Z ring // *Annu. Rev. Biochem.* 2007. № 76. P. 539-562.
2. Bonny M., Fischer-Friedrich E., Loose M., et al. Membrane Binding of MinE Allows for a Comprehensive Description of Min-Protein Pattern Formation // *PLOS Computational Biology.* 2013. T.9. №12. C.1–12

### **Численное моделирование функционирования и регуляции системы онкомаркеров**

*О. Ф. Воропаева*

Число показателей, претендующих на роль потенциальных маркеров злокачественных опухолей, постоянно растет. В мировой клинической практике в качестве одного из факторов онкопрогноза предлагается рассматривать белок p53, а также связанный с ним белок Mdm2 и кодирующие их гены. Важнейшая функция p53 состоит в ликвидации потенциально онкогенных клеток путем запуска программы p53-зависимого апоптоза (известно, что потеря этой функции обнаруживается в 50-70 % случаев злокачественных опухолей человека). Mdm2, ограничивая p53-зависимый апоптоз, действует как фактор выживания во многих типах клеток.

В рамках нелинейной динамической системы уравнений с запаздыванием проведено исследование особенностей функционирования сети p53–Mdm2 и ее реакции на изменение параметров модели. Основное внимание уделено изучению механизма управления системой в условиях стресса: поиску состояний, в которых возникают нарушения взаимосвязи белков p53 и Mdm2, а также определению путей выхода из нежелательных ситуаций для восстановления базального состояния системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант № НШ-5006.2014.9).

Список литературы

1. Воропаева О.Ф., Шокин Ю.И., Непомнящих Л.М., Сенчукова С.Р. Математическое моделирование функционирования и регуляции биологической системы p53–Mdm2 // Москва: Изд-во РАМН. 2014. 176с.

### **Статистически редкие неравномерно распределенные по ветвям филогенетического дерева аминокислотные замены связаны с ключевыми событиями в эволюции многоклеточных животных**

*К. В. Гунбин*

Исследование режимов эволюции белков и их связи с дивергентной эволюцией видов представляет как сложную вычислительную задачу, так и фундаментальную проблему современной биологии. Современные методы математического моделирования и реконструкции эволюции белков, учитывающие различие скоростей фиксации разных типов аминокислотных замен на разных ветвях филогенетического дерева и особенности аминокислотного состава белков, позволяют определять статистически редкие типы аминокислотных замен для каждого семейства белков. Использовались последовательности белков 100 многоклеточных животных, а также полученные биоинформационным подходом группировки этих белков. Рассмотрены задачи анализа эволюции протеомов, выявления в ходе эволюции этапов преобразования и сохранения структурно-функциональных характеристик белков и сопоставления этой информации с палеонтологическими данными о скоростях видо- и родообразования. Разработан комплекс параллельных программ для поиска статистически редких замен на филогенетическом дереве семейства белков.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (14-24-00123).

### **Компьютерное исследование эволюции коровых промоторов гоминид**

*К. В. Гунбин, М. П. Пономаренко, Е. И. Рогаев*

Исследование эволюции функционирования регуляторных участков генов и их связи с дивергенцией гоминид является вызовом для современной биологии, так как до сих пор не ясно, что именно способствовало формированию человека. Современные методы математического предсказания активности коровых промоторов, основанные на анализе аффинности ДНК к нуклеосоме и ТАТА-связывающему белку [1, 2], а также учитывающие частоту встречаемости CpG-динуклеотидов, позволяют теоретически определять изменения функции коровых промоторов. В работе использовались геномы человека, шимпанзе, гориллы и орангутана, а также данные о внутривидовом полиморфизме геномов этих видов. Рассмотрены задачи анализа эволюции коровых промоторов, анализа эволюционной взаимосвязи аффинности ДНК к нуклеосоме, ТАТА-связывающему белку и частоты встречаемости CpG-динуклеотидов. Разработан комплекс параллельных программ для анализа эволюции коровых промоторов.

Работа выполнена при поддержке правительства РФ (14.B25.31.0033).

Список литературы

1. Levitsky V.G. et al. *Bioinformatics*, 1999. 15(7/8):582-592.
2. Пономаренко П.М. и др. Докл. РАН. 2008. 419(6):828-832.

### **Обратная задача восстановления параметров интраокулярной линзы**

*В. А. Дедок*

Целью работы является разработка математических алгоритмов и программного обеспечения для определения оптимальных параметров имплантируемой интраокулярной линзы (искусственного хрусталика) при проведении хирургических операций при заболевании пациента катарактой.

Современные подходы основаны на применении вычислительно емкого метода трассировки лучей [1], но содержат ряд допущений, снижающих точность расчетов. Используя данный метод, автором был реализован алгоритм формирования точного изображения на сетчатке глаза человека. На основе данной реализации выполняется определение оптимальной формы и параметров преломления имплантируемой интраокулярной линзы, обеспечивающий требуемую остроту зрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00208), гранта мэрии г. Новосибирска молодым ученым и специалистам.



Список литературы

1. Einigamhammer J., Oltrup T., Bende T. and Jean B. The Individual Virtual Eye: a Computer Model for Advanced Intraocular Lens Calculation. J Optom, Vol. 2, No. 2, 2009, p. 70-82.

### **Компьютерный анализ кластеров сайтов связывания транскрипционных факторов в геноме с помощью метода ChIP-seq**

*А. И. Дергилёв, А. В. Свичкарёв, Ю. Л. Орлов*

Исследование сайтов связывания транскрипционных факторов (ССТФ) и их кластеров в геноме представляет сложную вычислительную задачу математической биологии. ССТФ – это участки ДНК, связанные с белковыми факторами транскрипции, которые не всегда однозначно описываются нуклеотидной последовательностью и могут быть предсказаны с ограниченной точностью. Рассматриваются задачи анализа полногеномных данных ChIP-seq, выявления координат сайтов ССТФ и сопоставления этой информации с геномной аннотацией (расположением генов, промоторных районов).

Также возникают задачи анализа распределения сайтов связывания в масштабе генома. задачи определения кластеров сайтов различных транскрипционных факторов, кластеров совместно или на близком расстоянии расположенных на хромосомах.

Технология ChIP-seq, сочетающая иммунопреципитацию хроматина (ChIP) и высокоэффективное секвенирование ДНК, позволяет определять участки связывания ДНК и белков. В данном проекте использовались экспериментальные данные ChIP-seq о положении мест связывания 13 различных транскрипционных факторов в геноме мыши (Chen, ...Orlov et al., Cell, 2008).

Технически необходимы программы быстрой обработки огромных массивов текстовых данных (BED файлы), определения участков пересечения геномных аннотаций, адаптируемые на соответствующие модельные геномы (мышь, человек, крыса). Разработана собственная программа на языке C++, которая рассчитывает кластеры по геномным координатам сайтов и записывает результаты в текстовый файл.

Также для анализа кластеров сайтов связывания используется метод установления комплексных сигналов и закономерностей по алгоритму “Дискавери” (Discovery), разработанный ранее в рамках теории анализа данных и открытий в контекстных сигналах участков ДНК (Data Mining, Knowledge Discovery).

### **Применение сопряжённых уравнений для исследования чувствительности в модели симпластного роста клеток линейного листа**

*А. В. Пененко, У. С. Зубаирова, С. В. Николаев*

Данная работа посвящена применению методов теории сопряжённых уравнений для исследования чувствительности в модели симпластного роста клеток линейного листа, предложенной авторами ранее. В модели мы использовали представление о клетке как об осмотической ячейке, помещенной в растущую оболочку из эластичного материала, и исследовали динамику длин клеток при условии их симпластного роста. Этот режим роста является особенностью растительных тканей и характеризуется тем, что клетки не сдвигаются друг относительно друга в процессе роста и топология ткани изменяется только в результате их деления. Объектом моделирования является эпидермис с простой геометрией роста, а именно, эпидермис линейного листа, который характерен, в частности, для пшеницы. Клеточная структура эпидермиса такого листа представляет собой почти параллельные ряды клеток, которые формируются в процессе морфогенеза из меристематического слоя, расположенного у основания листа. В данной работе приведены результаты вычислительных экспериментов по исследованию чувствительности видимой длины клетки - основной наблюдаемой переменной, - в конце заданного временного интервала к механическим параметрам модели, а также к вариациям длин других клеток массива и их фрагментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-14-00734).

### **Контекстный анализ научных публикаций по биологии и извлечение знаний**

*В. А. Иванисенко, Т. В. Иванисенко, П. С. Деменков*

Автоматическое извлечение знаний из текстов научных публикаций и их дальнейшее формализованное представление в виде ассоциативных семантических сетей является актуальной задачей современной науки. Высокая актуальность автоматического анализа научных текстов обусловлена огромным количеством научных публикаций накопленных в базах данных. Например, в базе данных PubMed на сегодняшний день содержится более 25 млн медико-биологических публикаций, ежегодный рост которых уже превышает 1 млн. Разработан программный комплекс ANDSystem, включающий модуль автоматического извлечения знаний с помощью семантических шаблонов, базу знаний ANDCell и программу ANDVisio, обеспечивающую доступ к базе знаний, анализ и визуализацию результатов запроса [1]. ANDCell содержит более 3 млн фактов о молекулярно-генетических и каталитических взаимодействиях между белками, генами, метаболитами и т.д., извлеченных из более 20 млн абстрактов научных статей, представленных в базе данных PubMed. ANDSystem позволяет реконструировать молекулярно-генетические сети, описывающие биологические процессы как в норме, так и при патологиях различных заболеваний, а также функциональные свойства белков и генов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-04-08065).

Список литературы

1. Ivanisenko V.A., Saik O.V., Ivanisenko N.V., Tiys E.S., Ivanisenko T.V., Demenkov P.S., Kolchanov N.A. ANDSystem: an Associative Network Discovery System for automated literature mining in the field of biology. BMC Systems Biology 2015, 9(Suppl 2):S2.

### **SeedCounter – мобильное и настольное приложение для массового фенотипирования зерен пшеницы**

*Е. Г. Комышев, М. А. Генаев, Д. А. Афонников*

Количественный анализ морфологических характеристик зерен пшеницы является важным этапом при выведении новых, высокоурожайных сортов. В поле, анализ зерен проводится вручную, что позволяет лишь подсчитывать количество зерен в колосе и измерять их вес. Измерение таких параметров как длина, ширина, округлость, цвет зерен существенно затруднено. Для высокопроизводительного фенотипирования зерен пшеницы мы реализовали мобильное приложение на основе платформы Android [1], которое распознает зерна пшеницы на листе бумаги и производит измерения их количественных характеристик. Версия приложения для персонального компьютера позволяет обрабатывать изображения, полученные с различных устройств, как, например, сканер или цифровая фотокамера.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта (14-07-31226).

Список литературы

1. Android: Программная платформа с открытым исходным кодом для широкого спектра мобильных устройств от компании Google. <http://www.android.com>.

### **The refinement of mathematical models of immunology and epidemiology**

*О. Krivorotko, S. Kabanikhin*

Many mathematical models of biological processes can be described by systems of nonlinear differential equations [1]

$$\dot{X} = P(X(t), q), \quad X(0) = X_0, \quad t > 0.$$

The problem of determining biological parameters  $q$  using additional measurements of blood test  $f_k$  at fixed times  $t_k$  is said to be an inverse problem. Optimization approach for identification those models

based on gradient type methods is introduced [2]. Inverse problems are formulated in the form of operator equation  $A(q)=f$  and then reduced to the minimization of the corresponding misfit functional  $J(q) = \|A(q) - f\|^2$ . The adjoint problems are used for calculating of gradients  $J'(q)$ . Mathematical models of competition between immune and tumor cells [3] and tuberculosis epidemic [4] are considered numerically. Results of numerical experiment are demonstrated. The project has been partially supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation.

#### References

1. G. I. Marchuk, *Mathematical Models in Immunology. Computational Methods and Experiments*, Nauka, Moscow, 3rd Ed., 1991.
2. S. I. Kabanikhin, *Inverse and Ill-Posed Problems: Theory and Applications*, de Gruyter, Berlin, 2011.
3. A. Bellouquid and M. Delitala, *Modelling Complex Biological Systems: A Kinetic Theory Approach*, Birkhäuser, Boston, Basel, Berlin, 2006.
4. K. K. Avilov and A. A. Romanyukha, *Mathematical models for Tuberculosis spread and control // Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2007. V. 2, iss. 2. P. 188–318.

### **Комплексные модели микробных сообществ**

*С. А. Лашин, А. И. Клименко, З. С. Мустафин, Р. К. Зудин, А. Д. Чеканцев, Ю. Г. Матушкин*

В природе микробы живут и эволюционируют в составе сообществ – бактериальных матов, биоплёнок и других пространственно распределённых комплексно взаимодействующих структур. Компьютерное моделирование является одним из важных инструментов исследования микробных сообществ (МС) как в фундаментальной биологии, так и в биотехнологических и медицинских задачах. Особой популярностью в последние годы пользуется многослойные (multiscale) модели, интегрирующие в одной комплексной модели серию более простых подмоделей, каждая из которых описывает отдельный уровень биологической организации.

В работе предлагаются новый подход для моделирования пространственно распределённых МС и программный комплекс ГЭК 3D, реализующий этот подход. В моделях рассматриваются следующие слои биологической организации: генетический, метаболический, популяционный и экологический. Для каждого слоя разработаны библиотеки подмоделей, описывающие процессы, относящиеся к соответствующему уровню биологической организации. Открытый программный интерфейс (API) [1] позволяет пользователям расширять библиотеки с помощью собственных подмоделей.

С помощью разработанных моделей был получен ряд нетривиальных результатов о влиянии пространственной организации МС на его эволюцию [2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-04-00620, 15-07-03879).

#### Список литературы

1. Lashin S. A. et al. *Math. Biol. Bioinf.* 2014;9(2):585-596.
2. Klimenko A.I. et al. *BMC Evol. Biol.* 2015, 15(Suppl 1):S3.

### **Моделирование паттернов движения *C. elegans* в программной среде Sibernetic**

*А. Ю. Пальянов, С.С. Хайрулин*

Основными особенностями разработанной нами ранее программной среды Sibernetic [1] являются поддержка несжимаемой жидкости, эластичного тела, сократимой мышечной ткани и водонепроницаемых пленок, а также поддержка высокопроизводительных параллельных вычислений на базе OpenCL и кросс-платформность (Windows/Linux/MacOS).

В данной работе представлена созданная в Sibernetic модель тела и мышечной системы *C. elegans*, обладающая высокой детализацией и реалистичностью. В частности, впервые воспроизведен "гидростатический скелет" – механизм, поддерживающий форму данного беспозвоночного организма благодаря упругой внешней оболочке и внутренней среде, находящейся под избыточным давлением. Модель включает эластичную оболочку тела, к которой изнутри прикреплены мышечные клетки (расположение которых соответствует таковому в реальном организме), снаружи покрытую водонепроницаемой пленкой, а внутри заполненную жидкостью. Подавая на мышцы различные

паттерны их сокращений, присущие реальному организму, и произведя необходимую настройку параметров модели, мы показали возможность осуществления характерных для *C. elegans* типов движений (вперед, назад, реверс, поворот, ползание/плавание).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-5714.2015.9 и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-07-31039 мол\_а).

Список литературы

1. Sibnetic: программный комплекс на базе алгоритма PCI SPH, ориентированный на задачи моделирования в области биомеханики живых систем // Вавиловский журнал генетики и селекции, 2014, том 18, № 4/3, с. 1239-1247.

### **Автоматизированное выделение и визуализация тромбов в легочной артерии по данным компьютерной томографической ангиографии**

*И. А. Пестунов, Д. В. Лазарев, А. А. Валентик, О. А. Дубровская, Ю. Н. Синявский*

Тромбоэмболия легочной артерии (ТЭЛА) – относительно распространенная сердечно-сосудистая патология, часто приводящая к летальному исходу (примерно один случай на тысячу населения в год). В настоящее время основным средством диагностики ТЭЛА является компьютерная томографическая ангиография: внутривенное введение контрастного вещества с последующей процедурой компьютерной томографии.

В докладе представлены метод и комплекс программ для автоматизированной локализации, оценки объема и трехмерной визуализации тромбов в легочных артериях на основе данных компьютерной томографической ангиографии. Для автоматизированного выделения тромбов на изображении используется метод наращивания областей, модифицированный для обработки результатов томографической ангиографии (наборов полутоновых изображений). Для работы используется "обучающая выборка" – фрагменты тромбов, выделенные экспертом. Алгоритм заключается в последовательном наращивании обучающих областей за счет соседних с ними пикселей.

Экспериментальные исследования показали, что области на изображении, соответствующие тромбам, не являются однородными по яркости и обладают выраженной текстурой. Поэтому простые пороговые методы сегментации, учитывающие только яркость пикселей, приводят к неудовлетворительным результатам. В предлагаемом методе, наряду с яркостью пикселя, используется информация о его окрестности.

Созданный программный комплекс использовался для анализа изображений, полученных с помощью аппарата Toshiba МЕС СТЗ и позволил значительно ускорить процесс диагностики ТЭЛА.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-07-31320-мол\_а).

### **Системная компьютерная биология: анализ и моделирование структурно-функциональной организации и эволюции генных сетей**

*Н. Л. Подколотный, Д. А. Афонников, В. А. Иванисенко, Ю. Г. Матушкин, Н. А. Колчанов*

В работе представлены результаты исследований, проведенных в рамках проекта РНФ "Системная компьютерная биология: анализ и моделирование структурно-функциональной организации и эволюции генных сетей", включая компьютерную систему реконструкции, анализа и моделирования генных сетей.

Разработана распределенная интегрированная компьютерная система для реконструкции, анализа генных сетей и моделирования генных сетей, включающая следующие программные компоненты (ПК): рабочее место для реконструкции генных сетей (редактор генных сетей), базу знаний по генным сетям, средства интеграции с системой автоматического извлечения знаний из текстов научных публикаций и баз данных (automated text and data mining) о структуре ГС, их молекулярных компонентах и взаимодействиях между ними, методы расширения ГС с помощью распознавания сайтов связывания транскрипционных факторов, использования экспериментальных ChIP-seq данных и др., ПК для построения структурных моделей ГС, использующая оригинальные методы

анализа структурно-функциональных закономерностей генных сетей, ПК моделирования динамики генных сетей, ПК для имитационного моделирования генных сетей, включая моделирование ковариантной эволюции белков, учитывающие: (i) наличие в белках ограниченных наборов позиций, в которых аминокислотная замена может фиксироваться без нарушения структуры или функции белков, а также (ii) частичное переопределение такого множества позиций после каждой аминокислотной замены.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-24-00123).

### **Computer analysis of biological networks**

*N. L. Podkolodny, N. N. Podkolodnaya, Z. D. Yakubova, O. A. Podkolodnaya*

The paper presents the methods of analysis of the structure of biological networks of different nature, including gene networks, molecular interaction networks, networks of gene co-expressions, diseases network, etc. The problems of standardization representation networks, methods of analysis of local and global topological properties of networks, methods of detection of the network subsystems and methods of comparing of network structure have been considered. The original method of calculation of the integral structural characteristics of the network as a principal component based on the structural characteristics of the local units – graphlets have been proposed.

On this basis, we developed a method of comparing the network and a statistical criterion for testing the hypothesis under consideration the network of its structural model in the form of random graphs.

The use of these approaches has allowed us to reconstruct an expanded version of the gene network of the mammalian circadian oscillator, to analyze the structure of the gene network, and to identify the central component of the circadian oscillator, which includes basic regulatory circuits passing through the key element of the circadian clock – the protein Clock/Bmal1 [1]. This structural model, which includes both the central component and functional subsystems interacting with it, can be the basis for building an extended mathematical model of the dynamics of the gene network regulating the circadian oscillator.

The work was supported by the RSF (the project № 14-24-00123).

#### References

1. OA Podkolodnaya, NN Podkolodnaya, NL Podkolodny The Mammalian Circadian Clock: Gene Regulatory Network and Computer Analysis // Russian Journal of Genetics: Applied Research, 2015, Volume 5, № 3.

### **Использование методов фрагментированного программирования для решения задачи сравнения миРНК и построения дендрограмм**

*А. Ю. Пыркова, А. Т. Иващенко*

В представленной статье рассмотрена задача сравнения последовательностей миРНК и построения дендрограмм. В ходе проведенного исследования авторами получены следующие результаты:

- разработана математическая модель сравнения миРНК;
- разработан распараллеленный и фрагментированный алгоритмы сравнения последовательностей миРНК;
- выполнена программная реализация алгоритма сравнения миРНК и построения дендрограмм;
- результаты работы программы были протестированы на данных о последовательностях миРНК, предоставленных сотрудниками кафедры биотехнологии КазНУ имени аль-Фараби.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научно-технических программ и проектов Комитетом науки МОН РК, проект "Разработка библиотеки параллельных подпрограмм для автоматизации создания больших параллельных численных моделей для суперкомпьютеров в области нефтяной геофизики".

#### Список литературы

1. Lesk Arthur M. Introduction to Bioinformatics. - Oxford: Oxford University Press, 2002. - 255 p.
2. Jones Neil C., Pevzner Pavel A. An Introduction to Bioinformatics Algorithms. - Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press, 2004. - 435 p.



## **Computer analysis and processing of gene expression data**

*A. M. Spitsina, Y. L. Orlov*

In recent years, various databases has accumulated a large body of experimental data obtained by using a DNA microarray. These data are essential for medicine and statistics. These data usually have a significant amount, and require computer processing. To work with such data was developed software package in C++ language. It is designed for statistical analysis and expression data preprocessing, and has options such as the calculation and construction of tissue-specific profiles, filtering genes according to available information on the location on the chromosomes, visualization of genes communication using correlation coefficients (linear and rank). Visualization is built in the form of a gene network using a script developed in Java. Were researched correlations of gene expression as part of gene networks circadian rhythm and cholesterol regulation, and genes responsible for aggressive behavior in mice. Obtained by program the results were analyzed and compared with the available in STRING database information about gene co-expression. The reconstruction of gene networks and visualization of relationships of genes from samples were examined. We used Affymetrix microarray data and RNA-Seq data. According to the results obtained using program, was made a comparative analysis of expression data and structural features of genes with high expression were identified.

This work was supported by grant RFFI №14-04-01906 and Budget Project ICG SB RAS VI.61.1.2.

### References

1. A. M. Spitsina, Yu. L. Orlov et al. "Supercomputer analysis of genomics and transcriptomics data revealed by high-throughput DNA sequencing", Program systems: theory and applications, 2015, 6:1(23), pp. 157–174. (In Russian.)
2. Y.L. Orlov et al. (2007) Quality assessment of the Affymetrix U133A&B probesets by target sequence mapping and expression data analysis, In Silico Biol., 7(3):241-60.

## **Многомерная модель голосования для описания динамики социальной группы**

*И. И. Тутов, Н. А. Колчанов*

Рассмотрена эволюция распределения  $n$  социальных норм внутри социальной группы. Предполагается, что каждая из социальных норм: (1) может принимать два значения, одно характерно для социальной группы, а другое – для внешнего окружения и (2) её изменение у каждого индивидуума происходит в результате парных обменов мнением внутри группы и под постоянным во времени внешним воздействием. Таким образом, задача сводится к рассмотрению неоднородной модели голосования во внешнем поле на  $n$ -мерном гиперкубе. Приведены решения для нескольких простейших модельных случаев. Показано, что построенная модель хорошо описывает социологические данные по динамике ассимиляции исламских меньшинств в Западной Европе.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Секция 1. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ  
И ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

<i>А. С. Апарцин</i>	5
<i>И. А. Блатов, Е. В. Китаева</i>	5
<i>P. N. Vabishchevich</i>	5
<i>V. T. Volkov, D. V. Lykuanenko</i>	6
<i>К. В. Воронин, Ю. М. Лаевский</i>	6
<i>А. В. Вяткин</i>	6
<i>Н. И. Горбенко</i>	7
<i>М. А. Давыдова</i>	7
<i>М. Т. Джениалиев, М. М. Амангалиева,</i>	
<i>М. Т. Космакова, М. И. Рамазанов</i>	7
<i>S. N. Dimova</i>	8
<i>С. В. Идимешев, С. К. Голушко</i>	8
<i>С. Г. Казанцев</i>	9
<i>Г. М. Кененбаева</i>	9
<i>О. А. Ковыркина, В. В. Остапенко</i>	9
<i>В. Д. Корнеев, В. М. Свешников</i>	10
<i>R. D. Lazarov, P. Minev, S. Srinivasan</i>	10
<i>А. Ф. Латыпов, О. В. Попик</i>	10
<i>Н. Т. Левашова, Н. Н. Нефедов,</i>	
<i>А. О. Николаева, А. О. Орлов</i>	11
<i>А. А. Мельникова, Н. Т. Левашова</i>	11
<i>И. Р. Муфтахов, Д. Н. Сидоров, А. Н. Тында</i>	12
<i>А. Б. Назимов, В. А. Морозов</i>	12
<i>N. N. Nefedov, L. Recke, K. R. Schneider</i>	12
<i>Е. А. Новиков</i>	13
<i>В. В. Остапенко, О. А. Ковыркина,</i>	
<i>Н. А. Зюзина</i>	13
<i>А. С. Паутов</i>	13
<i>А. В. Петухов, А. О. Савченко,</i>	
<i>В. М. Свешников</i>	14
<i>М. Д. Рамазанов</i>	14
<i>А. Н. Рогалев</i>	14
<i>Н. В. Снытников</i>	15
<i>S. I. Solov'ev</i>	15
<i>S. I. Solov'ev, P. S. Solov'ev, V. S. Zheltukhin</i>	16
<i>С. Б. Сорокин</i>	16
<i>С. В. Тиховская</i>	16
<i>М. В. Урев, К. В. Бродт</i>	17
<i>Л. Р. Фахрутдинов, Л. У. Султанов</i>	17
<i>М. Е. Фролов, С. И. Репин</i>	17

**Секция 2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
АЛГЕБРА И МЕТОДЫ  
АППРОКСИМАЦИИ**

<i>Б. М. Шумилов, Ж. Абдыкалык кызы</i>	18
---	----

<i>Р. Р. Ахунов, С. П. Куксенко, Т. Т. Газизов</i>	18
<i>В. В. Богданов</i>	19
<i>Ю. С. Волков, В. Л. Мирошниченко,</i>	
<i>А. Е. Салиенко</i>	20
<i>В. С. Гладких, Я. Л. Гурьева, Д. В. Перевозкин,</i>	
<i>А. В. Петухов, И. Н. Скопин</i>	20
<i>Y. L. Gurieva</i>	20
<i>А. О. Егоришин</i>	21
<i>М. Zhukova, A. Kalinkin</i>	21
<i>Г. И. Забиняко</i>	22
<i>А. И. Задорин</i>	22
<i>А. А. Зоткевич, Н. С. Моцартова,</i>	
<i>С. В. Кузнецов</i>	22
<i>В. П. Ильин</i>	23
<i>В. П. Ильин, Д. В. Перевозкин</i>	23
<i>Б. Л. Крукиер</i>	23
<i>Л. А. Крукиер</i>	24
<i>Л. А. Крукиер, Т. С. Мартынова</i>	24
<i>А. Ж. Кудуев, Б. М. Шумилов</i>	25
<i>А. И. Куликов</i>	25
<i>А. И. Куликов, А. А. Копылов</i>	26
<i>N. Malyshev, A. Knyazev</i>	26
<i>О. А. Махоткин</i>	26
<i>А. С. Попов</i>	26
<i>С. С. Примаков</i>	27
<i>S. G. Pudov</i>	27
<i>S.A. Solovuyev</i>	27
<i>N. A. Strelkov</i>	27
<i>М. Ю. Талтыкина, А. А. Каширин</i>	28
<i>А. V. Terekhov</i>	28
<i>Е. М. Fomenko</i>	28

**Секция 3. ЧИСЛЕННОЕ  
СТАТИСТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ  
МОНТЕ-КАРЛО**

<i>Т. А. Аверина</i>	30
<i>Т. А. Аверина, С. С. Артемьев,</i>	
<i>А. Л. Бондарева, Г. И. Змиевская</i>	30
<i>А. Ю. Амбос</i>	30
<i>М. А. Анисова, А. В. Войтишек</i>	31
<i>Г. А. Бабичева, Н. А. Каргаполова,</i>	
<i>В. А. Огородников</i>	31
<i>В. В. Белов, М. В. Тарасенков</i>	31
<i>А. В. Бурмистров</i>	32
<i>А. В. Войтишек, Е. Н. Андорный</i>	32
<i>К. С. Волосенко, Т. М. Товстик</i>	33
<i>С. А. Гусев</i>	33
<i>С. А. Гусев, В. Н. Николаев</i>	33

<i>О. О. Евсютин</i>	34	<i>В. С. Сидорова</i>	53
<i>С. М. Ермаков</i>	34	<i>И. Ю. Сильвестров, К. Г. Гадыльшин,</i>	
<i>Е. Г. Каблукова, А. Б. Каргин, Б. А. Каргин</i>	34	<i>Д. А. Неклюдов, В. А. Чеверда</i>	53
<i>L. P. Kamenshchikov, I. V. Krasnov</i>	35	<i>К. Э. Сорокин, Ю. В. Перепечко,</i>	
<i>Н. А. Каргаполова</i>	35	<i>Х. Х. Имомназаров</i>	54
<i>А. Е. Киреева</i>	36	<i>И. В. Суродина</i>	54
<i>А. Е. Киреева, К. К. Сабельфельд</i>	36	<i>П. А. Титов</i>	55
<i>Б. Ю. Лемешко</i>	36	<i>М. С. Хайретдинов, Г. М. Воскобойникова,</i>	
<i>N. E. Lepp</i>	37	<i>Г. Ф Седухина</i>	55
<i>В. Л. Лукинов</i>	38	<i>V. Tcheverda, V. Pozdnyakov, G. Reshetova,</i>	
<i>М. А. Marchenko</i>	38	<i>А. Merzlikina, V. Shilikov, V. Lisitsa</i>	56
<i>И. Н. Медведев</i>	38	<i>В. В. Червов</i>	56
<i>А. М. Медвяцкая, В. А. Огородников</i>	39	<i>Э. П. Шурина, Д. А. Архипов, М. И. Эпов</i>	56
<i>Г. А. Михайлов</i>	39	<i>А. В. Яблоков, А. С. Сердюков,</i>	
<i>С. М. Пригарин, Т. В. Алешина, Н. К. Че</i>	39	<i>А. А. Дучков, П. А. Дергач</i>	56
<i>С. В. Рогазинский, Г. А. Михайлов</i>	40		
<i>Н. В. Трачева, Г. А. Михайлов, С. А. Ухинов</i>	40		
<i>К. К. Sabelfeld</i>	40		
<i>К. К. Сабельфельд, А. Е. Киреева</i>	41		
<i>О. В. Сересева, А. Огородников</i>	41		
<i>С. С. Скворцов, Н. А. Каргаполова</i>	42		
<i>Е. А. Сухино-Хоменко, С. С. Городков</i>	42		
<i>В. А. Фалалева, Б. А. Фомин, Т. А. Сушкевич</i>	42		
<i>И. А. Шалимова</i>	43		
<i>Е. В. Шкарупа, М. Ю. Плотников</i>	44		
<i>М. А. Якунин</i>	44		
<b>Секция 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА</b>		<b>Секция 5. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</b>	
<i>Т. В. Абрамов, Б. В. Лунёв</i>	45	<i>И. Г. Авдеев, Р. Б. Зарипов,</i>	
<i>В. В. Аксенов</i>	45	<i>И. В. Колотовкин, В. Н. Крупчатников</i>	57
<i>В. В. Аксенов</i>	46	<i>А. Е. Алоян, А. Н. Ермаков,</i>	
<i>К. С. Алсынбаев</i>	46	<i>В. О. Арутюнян</i>	57
<i>Э. В. Арбузов, Е. В. Гайслер</i>	46	<i>Ж. Т. Бельдеубаева, С. Ж. Рахметуллина,</i>	
<i>Т. А. Voropina, А. Ротаненко</i>	47	<i>Е. М. Турганбаев, В. С.Кривых</i>	57
<i>Г. М. Воскобойникова, М. С. Хайретдинов</i>	47	<i>Н. Н. Богословский, С. И. Ерин</i>	58
<i>А. А. Дучков, А. С. Сердюков</i>	48	<i>И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников,</i>	
<i>А. Ф. Зайцева, К. В. Воронин, В. В. Лисица</i>	48	<i>Е. Н. Голубева, Г. А. Платов</i>	58
<i>Ш. Х. Имомназаров, В. Н. Доровский,</i>		<i>А. Ф. Воеводин, В. С. Никифоровская</i>	59
<i>А. А. Михайлов</i>	49	<i>Е. Н. Голубева, Г. А. Платов, Д. Ф. Якишина,</i>	
<i>Н. Б. Иткина, С. И. Марков</i>	49	<i>М. В. Крайнева</i>	59
<i>Д. А. Караваев, И. М. Куликов,</i>		<i>В. К. Гусяков, Ю. И. Шокин, Л. Б. Чубаров,</i>	
<i>А. А. Якименко</i>	49	<i>С. А. Бейзель</i>	60
<i>В. В. Ковалевский, А. Г. Фатьянов,</i>		<i>А. В. Елисеев, И. И. Мохов,</i>	
<i>Д. А. Караваев, Ц. А. Тубанов</i>	50	<i>А. В. Чернокульский</i>	60
<i>А. В. Мариненко, М. И. Эпов</i>	50	<i>М. В. Зарецкая, А. Г. Зарецкий</i>	60
<i>А. А. Никитин, А. С. Сердюков, А. А. Дучков</i>	51	<i>А. В. Калинин, Е. А. Мареев, Н. Н. Слюняев,</i>	
<i>Ю. А. Орлов</i>	51	<i>А. А. Жидков</i>	61
<i>Д. В. Петров, В. М. Михелев</i>	52	<i>Н. В. Киланова, Е. Г. Климова, А. Н. Зудин</i>	61
<i>А. М. Санчаа, И. В. Суродина, А. А. Власов,</i>		<i>Е. Г. Климова</i>	62
<i>Н. Н. Неведрова, А. А. Сафиуллина</i>	52	<i>В. Н. Крупчатников, И. В. Боровко,</i>	
		<i>Ю. В. Мартынова</i>	62
		<i>А. И. Крылова, В. А. Шлычков</i>	63
		<i>В. И. Кузин, В. Н. Крупчатников,</i>	
		<i>Е. Н. Голубева, Г. А. Платов, В. В. Малахова,</i>	
		<i>А. И. Крылова, И. В. Боровко, Н. А. Лаптева,</i>	
		<i>А. А. Фоменко, Ю. В. Мартынова</i>	63
		<i>Л. И. Курбацкая, А. Ф. Курбацкий</i>	63
		<i>Л. Э. Лапина, И. М. Успенский</i>	64
		<i>А. А. Леженин, В. Ф. Рапута,</i>	
		<i>Т. В. Ярославцева</i>	64

<i>В. В. Малахова, Г. А. Платов</i>	65	<i>Г. А. Щукин, В. А. Перепелкин</i>	84
<i>Е. А. Мамаиш, П. В. Воронина, В. А. Кихтенко,</i>			
<i>В. В. Смирнов, Д. Л. Чубаров</i>	65		
<i>Ан. Г. Марчук</i>	66		
<i>В. Г. Мизяк, А. В. Шляева, М. А. Толстых</i>	66		
<i>В. В. Носов, В. П. Лукин, Е. В. Носов,</i>			
<i>А. В. Торгаев</i>	67		
<i>А. В. Пененко, В. В. Пененко</i>	67		
<i>В. В. Пененко</i>	67		
<i>Е. V. Perekhodtseva</i>	68		
<i>Е. V. Perekhodtseva</i>	68		
<i>Э. А. Пьянова, Д. В. Перевозкин,</i>			
<i>Л. М. Фалейчик</i>	68		
<i>Э. А. Пьянова, Л. М. Фалейчик</i>	69		
<i>Э. А. Пьянова, Л. М. Фалейчик</i>	69		
<i>В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева</i>	70		
<i>С. Ж. Рахметуллина, А. А. Бубликов,</i>			
<i>А. В. Пененко, Е. М. Турганбаев</i>	70		
<i>Г. С. Ривин</i>	71		
<i>Г. С. Ривин, И. А. Розинкина, Д. В. Блинов,</i>			
<i>М. В. Шатунова</i>	71		
<i>А. В. Старченко, А. А. Барт, Л. И. Кижнер,</i>			
<i>М. В. Терентьева</i>	71		
<i>Т. А. Сушкевич, С. А. Стрелков,</i>			
<i>С. В. Максакова, Л. Д. Краснокутская</i>	72		
<i>М. В. Терентьева, А. В. Старченко</i>	73		
<i>Е. А. Цветова</i>	73		
<i>Д. Л. Чубаров, В. А. Кочнев</i>	74		
<i>В. В. Чуруксаева, А. В. Старченко</i>	74		
<i>М. S. Yudin</i>	75		
<i>T. V. Iakubailik, L. A. Kompaniets</i>	75		
<i>Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута</i>	76		
<b>Секция 6. ПРОГРАММИРОВАНИЕ</b>			
<i>А. В. Андерс, А. А. Калинин, Р. В. Андерс</i>	77		
<i>С. Б. Арыков</i>	77		
<i>С. Аубакиров, А. Т. Бектемесов</i>	77		
<i>А. А. Бучнев, В. П. Пяткин</i>	78		
<i>М. А. Городничев, С. А. Вайцель</i>	79		
<i>К. В. Калгин, С. Е. Киреев</i>	79		
<i>Е. Д. Каропова, А. В. Вяткин, А. А. Ефремов</i>	79		
<i>V. N. Kasyanov</i>	80		
<i>С. Е. Киреев, В. Г. Сарычев</i>	80		
<i>E. V. Kulakova, G. Li, Y. L. Orlov</i>	81		
<i>О. А. Ляхов</i>	82		
<i>О. Г. Монахов, Э. А. Монахова,</i>			
<i>Г. Ы. Токтошов</i>	82		
<i>М. Ostarkevich, A. Aillet, A. Gougeon</i>	82		
<i>М. В. Ostarkevich, E. G. Kostsov</i>	83		
<i>В. Г. Сарычев</i>	83		
<i>И. Н. Скопин</i>	83		
<i>А. А. Ткачёва</i>	84		
		<i>А. К. Алексеев</i>	86
		<i>Г. В. Алексеев, А. В. Лобанов, Ю. Э. Спивак</i>	86
		<i>Д. В. Алексеев, А. В. Травин</i>	86
		<i>D. S. Anikopov</i>	87
		<i>А. Н. Бондаренко, В. А. Дедок</i>	87
		<i>С. А. Бутерин</i>	88
		<i>А. Л. Бухгейм, А. А. Бухгейм</i>	88
		<i>В. И. Васильев, А. М. Кардашевский</i>	88
		<i>В. В. Васин</i>	89
		<i>С. З. Джамалов</i>	89
		<i>А. А. Ершова, В. П. Танана</i>	90
		<i>К. Б. Иманбердиев, К. А. Айменова</i>	90
		<i>Х. Х. Имомназаров, А. С. Бердышев,</i>	
		<i>А. Э. Холмурадов</i>	91
		<i>И. Г. Казанцев</i>	91
		<i>А. Л. Карчевский, И. В. Марчук</i>	91
		<i>В. В. Козодеров, Е. В. Дмитриев,</i>	
		<i>В. Д. Егоров</i>	92
		<i>К. Ф. Коледина, С. Н. Коледин</i>	92
		<i>С. И. Колесникова</i>	92
		<i>Д. С. Коновалова</i>	93
		<i>А. И. Короткий, Д. А. Ковтунов,</i>	
		<i>А. Т. Исмаил-Заде, О. Э. Мельник,</i>	
		<i>И. А. Цепелев</i>	93
		<i>В. Б. Костоусов, В. И. Бердышев</i>	94
		<i>А. С. Леонов</i>	94
		<i>D. V. Lykuanenko</i>	94
		<i>С. В. Мальцева, А. П. Полякова,</i>	
		<i>И. Е. Светов</i>	95
		<i>V. I. Priimenko, M. P. Vishnevskii</i>	95
		<i>И. В. Прохоров, А. А. Суценко</i>	95
		<i>А. Н. Рогалев, С. В. Доронин, Е. В. Рейзмунт</i>	96
		<i>Б. Рысбайулы, А. А. Адамов,</i>	
		<i>Ж. Карашибаева</i>	96
		<i>О. В. Соболева</i>	97
		<i>Е. В. Табаринцева</i>	97
		<i>В. П. Танана</i>	98
		<i>В. П. Танана, Е. Ю. Вишняков,</i>	
		<i>А. И. Сидикова</i>	98
		<i>О. С. Трубачева, М. Г. Персова</i>	98
		<i>В. М. Филатова, Г. Н. Ерохин,</i>	
		<i>Л. Н. Пестов</i>	99
		<i>V. Tcheverda, G. Chavent, K. Gadylshin</i>	99
		<i>Yu. A. Chirkunov</i>	99
		<i>Д. В. Чурбанов</i>	100
		<i>М. А. Шишленин</i>	100
		<i>Б. Б. Шолпанбаев, С. И. Кабанихин,</i>	
		<i>М. А. Шишленин</i>	100



*А. Г. Ягола* 101  
*А. Г. Ягола* 101

### **Секция 8. ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

*А. С. Verdyshev, В. Е. Векбаиов,*  
*А. Т. Rakhymova* 102  
*Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк,*  
*В. В. Ковалевский* 102  
*К. И. Будников, А. В. Курочкин,*  
*А. А. Лубков, А. В. Яковлев* 103  
*I. V. Gorbunov, K. S. Sarin* 103  
*А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский*  
*V. A. Debelov* 104  
*М. Р. Еникеев, И. М. Губайдуллин* 104  
*Л. В. Еникеева, Н. Ф. Мурзаева* 105  
*А. Г. Квашинин, С. Н. Астраков,*  
*С. Ю. Вильчек* 105  
*Д. Б. Короленко, Е. П. Золотухин,*  
*А. П. Кузьменко, В. С. Сабуров* 106  
*К. Е. Крамаренко, О. В. Молдованова* 106  
*А. П. Кузьменко, В. С. Сабуров,*  
*Е. П. Золотухин, Н. Г. Кузьмин* 107  
*И. И. Кулагин, М. Г. Курносоев* 107  
*М. А. Курако, Ан. Г. Марчук,*  
*К. В. Симонов* 107  
*А. А. Лубков, С. В. Власов, В. Н. Котов,*  
*А. С. Максимов, Ю. А. Попов* 108  
*А. С. Мамаев, О. З. Гусев, В. В. Колодей,*  
*С. Р. Шакиров* 108  
*Д. А. Мигов* 108  
*О. Г. Монахов, Э. А. Монахова* 109  
*К. А. Нечунаева* 109  
*К. В. Павский, В. А. Павский* 109  
*Е. Н. Перышкова, А. В. Ефимов,*  
*С. Н. Мамоиленко* 110  
*А. В. Писарев, С. Ю. Вильчек,*  
*А. Г. Квашинин, С. Р. Шакиров* 110  
*А. Г. Плавник, А. Н. Сидоров* 111  
*Г. И. Салов, В. П. Пяткин* 111  
*Д. О. Смолин, В. В. Колодей, А. С. Мамаев,*  
*С. Р. Шакиров* 111  
*О. Д. Соколова* 112  
*Г. А. Сулейманова* 112  
*М. С. Тарков* 113  
*Г. П. Чейдо., С. К. Голушко., Б. Н. Пищик,*  
*С. Р. Шакиров* 113  
*Ю. В. Чугуй* 113  
*О. Э. Якубайлик* 114

### **Секция 9. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

*Е. В. Амелина, С. К. Голушко, А. Ю. Горнов,*  
*Т. С. Зароднюк* 115  
*В. А. Андриющенко, Л. П. Кондаурова,*  
*С. К. Немировский* 115  
*А. С. Апарцин, Е. В. Маркова,*  
*И. В. Сидлер, В. В. Труфанов* 115  
*Э. В. Арбузов, В. А. Арбузов,*  
*О. С. Мелёхина* 116  
*И. В. Афанаскин, А. В. Королёв,*  
*В. А. Юдин, С. Г. Вольтин* 116  
*Д. Ж. Ахмед-Заки, С. Т. Мухамбетжанов,*  
*Т. Иманкулов, О. Турар* 117  
*В. А. Бабешко* 118  
*О. М. Бабешко* 118  
*Д. Р. Байгереев, Н. М. Темирбеков* 119  
*Н. М. Байназарова, Д. А. Пичугина* 120  
*О. Л. Бандман* 120  
*Е. А. Берендеев* 121  
*Е. В. Бирюкова, К. Ф. Коледина* 121  
*С. П. Борисов, А. Н. Кудрявцев* 121  
*М. А. Боронина, В. А. Вишников* 122  
*И. В. Бычков, В. И. Зоркальцев,*  
*И. В. Мокрый* 123  
*I. A. Vaseva, M. P. Fedoruk,*  
*A. M. Rubenchik, S. K. Turitsyn* 123  
*Н. В. Верниковская* 123  
*А. А. Витвицкий* 124  
*Ю. М. Волчков, Е. Н. Полтавская* 124  
*В. А. Вишников, В. К. Кедринский* 125  
*Л. В. Вишкова, Г. И. Дудникова,*  
*Т. В. Лисейкина, Е. А. Месяц* 125  
*Н. Ф. Габсаликова, Д. В. Бережной* 126  
*Р. В. Галев, А. Н. Кудрявцев,*  
*С. И. Трашкеев* 126  
*С. Ю. Гатилов* 127  
*А. П. Герасев* 127  
*С. А. Гоголева, В. А. Толпаев* 127  
*С. К. Голушко* 128  
*Н. И Горбенко, В. П. Ильин, Л. Л. Фруммин* 128  
*А. Г. Gorobchik* 128  
*А. В. Григорьев, Н. М. Афанасьева* 129  
*Ю. Г. Губарев, А. И. Светоносоев* 129  
*О. И. Гусев, Г. С. Хакимзянов* 130  
*М. Н. Гуш* 130  
*Р. Л. Давыдов, Л. У. Султанов* 131  
*О. В. Евдокимова* 131  
*А. А. Ефимова, Г. И. Дудникова* 132  
*В. П. Жуков, Н. М. Булгакова,*  
*М. П. Федорук* 132



<i>С. С. Журавлев, В. В. Окольников,</i>		<i>В. В. Пикалов</i>	149
<i>И. В. Меркулов, С. В. Рудометов,</i>		<i>Е. О. Пикмуллина, Ю. А. Чиркунов</i>	149
<i>С. Р. Шакиров</i>	133	<i>Д. О. Пиманов, С. И. Фадеев, Э. Г. Косцов</i>	150
<i>А. А. Захаров, Ю. И. Димитриенко,</i>		<i>Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский,</i>	
<i>М. Н. Коряков</i>	133	<i>С. Г. Миронов</i>	150
<i>Г. К. Кайшибаева, Л. А. Алексеева</i>	134	<i>К. А. Поташев, А. Б. Мазо</i>	150
<i>Т. А. Кандрюкова, Ю. М. Лаевский</i>	134	<i>А. С. Родионов</i>	151
<i>Г. Р. Карамутдинова, И. М. Губайдуллин,</i>		<i>Н. И. Родченкова, Ю. В. Заика</i>	151
<i>Е. И. Кулиш, К. Ф. Коледина</i>	135	<i>К. А. Рыбаков</i>	152
<i>Е. Д. Каропова, Е. В. Дементьева,</i>		<i>В. Rysbaifuly, Т. В. Akishev,</i>	
<i>В. В. Шайдуров</i>	135	<i>А. N. Satybaldina</i>	152
<i>Е. С. Кирик, А. В. Мальшев</i>	136	<i>А. Ф. Сапегина</i>	153
<i>О. Ю. Кирьянова</i>	136	<i>А. Н. Семенов, С. А. Гапонов</i>	153
<i>В. М. Ковеня, П. В. Бабинцев, А. А. Еремин</i>	137	<i>Б. В. Семисалов, А. М. Блохин</i>	154
<i>В. В. Козгай, Т. М. Хлебодарова,</i>		<i>Б. В. Семисалов, С. К. Голушко</i>	154
<i>С. И. Фадеев, В. А. Лихошвай</i>	137	<i>Б. В. Смородский, С. А. Гапонов</i>	155
<i>А. С. Козелков</i>	137	<i>Н. В. Снытников, В. А. Вишневков</i>	155
<i>А. С. Козелков, А. А. Куркин,</i>		<i>Т. В. Снытникова, В. А. Вишневков,</i>	
<i>Е. Н. Пелиновский</i>	138	<i>Г. И. Дудникова</i>	156
<i>А. Н. Козырев, А. В. Петухов,</i>		<i>О. Н. Соболева</i>	156
<i>В. М. Свешиников</i>	138	<i>С. В. Солодуша</i>	157
<i>А. Е. Колесов, П. Н. Вабищевич</i>	139	<i>М. С. Соппа</i>	157
<i>Л. П. Кондаурова</i>	139	<i>В. А. Спиряев, А. А. Левин</i>	157
<i>А. В. Королёв, В. Б. Бетелин, В. А. Юдин,</i>		<i>О. А. Stadnichenko, V. N. Snytnikov,</i>	
<i>И. В. Афанаскин, С. Г. Вольпин</i>	139	<i>VI. N. Snytnikov, N. S. Masyuk</i>	158
<i>И. М. Куликов</i>	140	<i>С. П. Степанов, И. К. Сирдитов,</i>	
<i>А. Д. Кунцевич, В. Н. Мануилов</i>	140	<i>А. Н. Цеева, М. В. Васильева,</i>	
<i>Г. Г. Лазарева</i>	141	<i>В. И. Васильев</i>	158
<i>А. В. Лежнев, В. Г. Лежнев</i>	141	<i>О. Р. Stoyanovskaya, N. V. Snytnikov,</i>	
<i>Т. V. Liseykina, G. I. Dudnikova,</i>		<i>Е. I. Vorobyov, A. G. Zhilkin, V. N. Snytnikov</i>	159
<i>В. А. Vshivkov</i>	141	<i>Т. А. Сушкевич</i>	159
<i>Ю. В. Лиханова, С. Б. Медведев,</i>		<i>А. А. Таюрский, М. Б. Гавриков</i>	160
<i>М. П. Федорук, П. Л. Чаповский</i>	142	<i>И. И. Титов, А. А. Блинов</i>	161
<i>В. В. Любимов</i>	142	<i>О. А. Ткаченко, В. А. Ткаченко</i>	161
<i>А. Н. Марковский, В. Г. Лежнев</i>	143	<i>Ф. Ж. Тураев, Б. А. Худаяров</i>	161
<i>Е. А. Mesyats, A. V. Snytnikov</i>	143	<i>А. К. Тураров, Н. М. Темирбеков</i>	162
<i>А. А. Михайлов</i>	144	<i>О. В. Ушакова, Н. А. Артемова,</i>	
<i>А. А. Михайлов, А. С. Бердышев,</i>		<i>Т. Н. Бронина, А. И. Анучина,</i>	
<i>Х. Х. Имомназаров</i>	144	<i>В. И. Гордейчук</i>	162
<i>А. В. Молчанов, А. Н. Козырев</i>	144	<i>Л. Р. Фахрутдинов, Д. В. Бережной</i>	163
<i>А. Н. Наимов, Н. Н. Монаркин</i>	145	<i>З. И. Федотова, Г. С. Хакимзянов</i>	163
<i>Л. Ф. Нурисламова, И. М. Губайдуллин</i>	145	<i>М. С. Фокина</i>	164
<i>Г. А. Ostanin, D. N. Zorin, A. Yu. Mikhalev,</i>		<i>Л. Л. Фрумин, Д. А. Шапиро</i>	164
<i>Г. V. Oseledets</i>	146	<i>М. Р. Хамидуллин, А. Б. Мазо,</i>	
<i>В. И. Паасонен</i>	146	<i>К. А. Поташев</i>	165
<i>А. В. Павлова, М. С. Капустин,</i>		<i>А. Э. Холмурадов</i>	165
<i>И. С. Телятников</i>	147	<i>В. В. Червов</i>	165
<i>М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик,</i>		<i>Д. М. Черенков, С. В. Зуев</i>	166
<i>Д. В. Вагин, Ю. И. Кошкина</i>	147	<i>Г. Г. Черных, О. Ф. Воропаева</i>	166
<i>А. И. Пестунов, А. М. Федотов</i>	147	<i>А. Г. Чечинова, К. А. Поташев</i>	166
<i>В. Е. Петров</i>	148	<i>А. Ф. Шайхнурова, К. Ф. Коледина,</i>	
<i>В. В. Пикалов</i>	148	<i>С. Н. Коледин</i>	167

*Е. В. Шелепова, А. А. Ведягин,  
И. В. Мишаков, А. С. Носков  
Ю. В. Шпакова, И. О. Богданов, Ю. И.  
Димитриенко, С. В. Сборщиков  
Э. А. Эшаров, Б. М. Шумилов  
С. Н. Яковенко  
С. Н. Яковенко*

**Секция 10. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ  
ИММУНОЛОГИЯ, БИОЛОГИЯ И  
МЕДИЦИНА**

*Н. А. Алемасов, Н. В. Иванисенко,  
В. А. Иванисенко  
В. С. Антюфеев  
О. В. Аркова, Д. А. Рассказов.,  
И. А. Драчкова., П. М. Пономаренко,  
Т. В. Аршинова, М. П. Пономаренко,  
Л. К. Савинкова, Н. А. Колчанов  
А. М. Varlukova, F. Hubert, S. Honoré  
А. А. Витвицкий  
О. Ф. Воропаева  
К. В. Гунбин  
К. В. Гунбин, М. П. Пономаренко,  
Е. И. Рогаев*

*В. А. Дедок  
А. И. Дергилёв, А. В. Свичкарёв,  
Ю. Л. Орлов  
А. В. Пененко, У. С. Зубаирова,  
С. В. Николаев  
В. А. Иванисенко, Т. В. Иванисенко,  
П. С. Деменков  
Е. Г. Комышев, М. А. Генаев,  
Д. А. Афонников  
O. Krivorotko, S. Kabanikhin  
С. А. Лашин, А. И. Клименко,  
З. С. Мустафин, Р. К. Зудин,  
А. Д. Чеканцев, Ю. Г. Матушкин  
А. Ю. Пальянов, С. С. Хайрулин  
И. А. Пестунов, Д. В. Лазарев,  
А. А. Валентик, О. А. Дубровская,  
Ю. Н. Синяевский  
Н. Л. Подколodный, Д. А. Афонников,  
В. А. Иванисенко, Ю. Г. Матушкин,  
Н. А. Колчанов  
N. L. Podkolodnyu, N. N. Podkolodnaya,  
Z. D. Yakubova, O. A. Podkolodnaya  
А. Ю. Пыркова, А. Т. Иващенко  
А. М. Spitsina, Y. L. Orlov  
И. И. Тутов, Н. А. Колчанов*

Тезисы Международной конференции  
"АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ – 2015",  
посвященной 90-летию со дня рождения  
академика Гурия Ивановича Марчука

Ответственные за выпуск:  
*А. В. Пененко, М. А. Боронина*

Компьютерная верстка *О. Г. Заварзина*

Подписано к печати 9.10.2015. Формат 60×84, 1/8.  
Усл. печ. л. 21,8. Уч. изд. л. 15,1. Тираж 450 экз. Заказ № .

Отпечатано в типографии "Академиздат", 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева,  
д. 6/1, оф. 622; тел. +7 (383) 380 65 20.