

УДК 004.42

DOI: 10.25559/SITITO.15.201904.1003-1012

Свободная система математического моделирования SIMFOR на базе компилятора Gfortran

Е. Р. Алексеев^{1*}, Д. А. Лутошкин², В. В. Стародумов²

¹ Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия

350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149

* er.alekseev@yandex.ru

² Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36

Аннотация

Данная статья посвящена разработанной авторами свободной системе математического моделирования. Обоснован выбор языка Фортран в качестве базового языка системы моделирования. Описаны особенности современных версий стандарта Фортрана: новые типы данных, современные массивы, возможности разработки конвейерных и параллельных программ. Представлены основные требования к системе моделирования. Обоснована разработка системы под свободной лицензией. Описана структура и основные модули системы: интегрированная среда разработки, основанная на текстовом редакторе Emacs; библиотека последовательных и параллельных алгоритмов численного анализа; библиотека графического вывода результатов; скрипт сборки библиотек и установки системы на локальный компьютер или вычислительный кластер. Приводятся ключевые особенности разработанной графической библиотеки: возможности вращения и перемещения построенных графических объектов. Представлены прототипы всех подпрограмм, входящих в библиотеку численного анализа. Подробно описаны принципы построения интегрированной среды на базе текстового редактора Emacs: приведён перечень внешних свободных модулей и модулей разработанных авторами. Представлена технология сборки системы. Приводится адрес программы, описания, исходных кодов в сети Интернет. Описаны возможные области применения системы. Обосновано использование системы при обучении студентов параллельному программированию и численным методам.

Ключевые слова: система математического моделирования SIMFOR, математическое моделирование, вычислительная математика, программирование, компилятор gfortran, технологии параллельного программирования, комассивы, автораспараллеливание, MPI, OpenMP.

Для цитирования: Алексеев Е. Р., Лутошкин Д. А., Стародумов В. В. Свободная система математического моделирования SIMFOR на базе компилятора Gfortran // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 4. С. 1003-1012. DOI: 10.25559/SITITO.15.201904.1003-1012

© Алексеев Е. Р., Лутошкин Д. А., Стародумов В. В., 2019



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Free Mathematical Modeling System SIMFOR Based on Gfortran Compiler

E. R. Alekseev^{1*}, D. A. Lutoshkin², V. V. Starodumov²

¹ Kuban State University, Krasnodar, Russia

149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russia

* er.alekseev@yandex.ru

² Vyatka State University, Kirov, Russia

36 Moskovskaya Str., Kirov 610000, Russia

Abstract

In this article, we present a new mathematical modeling system SIMFOR which is based on Gfortran compiler. We review a modern state of Fortran programming language and characterize main features of modern standard: new data types, modern arrays, support of conveyor and parallel programs. Main requirements for system are outlined. The usage of free license is justified. Structure and main modules of system is described. Main modules are following: Emacs based integrated development environment; library of sequential and parallel algorithms of numerical calculus mathematics; graphical output library; shell script for system building and installation on local computer or computational cluster. The main features of developed graphic library are given: ability to move and turn graphic objects. Interfaces of all routines included in the library of numerical analysis are presented. The principles of building an integrated environment based on the Emacs text editor are described in detail: a list of external free modules and modules developed by the authors is given. System assembly technology introduced. Article also contains a link to system repository in internet, which contains detailed description and source codes. Possible applications of the system are described. The use of the system in teaching students parallel programming and numerical methods is justified.

Keywords: mathematical modeling system SIMFOR, calculus mathematics, programming, compiler gfortran, technologies of parallel programming, co-arrays, auto parallelization, MPI, OpenMP.

Keywords: mathematical modeling system SIMFOR, calculus mathematics, programming, compiler Gfortran, technologies of parallel programming, co-arrays, auto parallelization, MPI, OpenMP.

For citation: Alekseev E.R., Lutoshkin D.A., Starodumov V.V. Free Mathematical Modeling System SIMFOR Based on Gfortran Compiler. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(4):1003-1012. DOI: 10.25559/SITI-TO.15.201904.1003-1012



Введение

Современные задачи моделирования, встречающиеся при решении инженерных задач, проблем биологии и во многих других отраслях человеческой деятельности имеют ряд отличий:

- каждая задача сложна и уникальна и для её решения необходимо потратить большое количество рабочего времени специалистов и огромное количество машино-часов;
- дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных, описывающиеся физические, технические и биологические процессы довольно сложны;
- матричные разностные уравнения, получающие в результате дискретизации дифференциальных уравнений требуют огромного количества вычислений;
- для решения уравнений требуется разработка узкоспециальных программ, которые имеют ряд особенностей: в этих приложениях производится большое количество вычислений, для работы программ необходимо большое количество памяти, программы зачастую содержат графический вывод результатов;
- но вместе с тем разрабатываемые узкоспециальные приложения очень часто включают ряд довольно стандартных алгоритмов (решение огромных систем линейных алгебраических уравнений, операции над матрицами большой размерности ($n \sim 10\,000 - 1\,000\,000$) и т.д.).

Необходимо отметить, что для разработки современных программ математического моделирования физических, технических и биологических процессов программисту необходимо достаточно глубоко вникать в предметную область, хорошо знать методы вычислительной математики, а также уметь разрабатывать высокоэффективные приложения, используя конвейерные вычисления и современные технологии параллельного программирования.

Подобные задачи, модели и программные комплексы рассмотрены в трудах современных отечественных и зарубежных исследователей [1-17]. Практически все исследователи используют в своих программных моделях и реализациях современные технологии параллельного программирования, такие как MPI, CUDA, OpenMP. Отдельные работы [18-20] посвящены исследованию новых возможностей технологий параллельного программирования. Активно ведётся работа по разработке отдельных программ, реализующих параллельные алгоритмы обработки матрицы [21,22].

Усложнение уравнений и систем, описывающих физические, технологические, биологические процессы приводит к необходимости при решении каждой задачи разрабатывать параллельные алгоритмы решения конкретных задач вычислительной математики и писать реализующий эти алгоритмы код на современном языке программирования, поддерживающем технологии параллельных вычислений.

Ещё одной проблемой, с которой сталкивается разработчик конкретной системы математического моделирования является следующая. Практически невозможно использовать опыт и коды разработчиков других систем, изложенных в научных работах. Современные библиотеки, реализующие эффективные параллельные алгоритмы вычислительной математики, являются **проприетарными**, пользователь не имеет доступа к исходному коду и не может адаптировать функции и проце-

дуры из библиотек параллельных вычислительных алгоритмов для решения своих задач. По-прежнему задача разработки программного продукта для решения задачи математического моделирования является сложной, дорогостоящей, громоздкой и длительной по времени.

Ещё одной проблемой стоящей перед разработчиками систем математического моделирования является отсутствие универсальной интегрированной среды разработки параллельных приложений, которая бы работала и на локальном компьютере, на локальном кластере лаборатории, и на большом вычислительном кластере организации.

Постановка задачи

Перед авторами стояла задача разработать систему математического моделирования, которая бы упростила разработку специализированных программ моделирования физических, технологических, биологических, инженерных и др. процессов.

Требования к системе моделирования.

1. В основе системы должен лежать язык программирования, который имеет свободный транслятор компилирующего типа;
2. Язык программирования должен поддерживать все современные технологии параллельного программирования, такие как OpenMP, CUDA, MPI, автораспараллеливание;
3. Свободная библиотеки основных алгоритмов вычислительной математики. Необходимо реализовать последовательные и параллельные версии подпрограмм алгоритмов вычислительной математики. Параллельные версии подпрограмм должны быть адаптированы для систем как с общей, так и с распределённой памятью, что позволит использовать библиотеку как на локальных компьютерах, так и на вычислительных кластерах.
4. Наличие библиотеки, позволяющей осуществлять графический вывод результатов.
5. Отладчик, который позволяет отлаживать, как последовательные, так и параллельные приложения.
6. Универсальная свободная интегрированная среда разработки, которая будет работать на локальном ПК, кластере на базе локальной сети, большом вычислительном кластере. Свободная среда разработки объединит текстовый редактор, отладчик, компилятор, библиотеку программ вычислительной математики в единый программный комплекс.

Выбор языка программирования системы моделирования

Среди языков, поддерживающих современные технологии параллельного программирования (OpenMP, MPI, CUDA), можно выделить C, C++, Фортран¹.

Язык Фортран сохранил основные заложенные в него в начале разработки черты: быстрота первоначального освоения непрофессиональными программистами, хорошая читаемость программ, высокая скорость компиляции и выполнения программ, совместимость с предыдущим синтаксисом. Современ-

¹ Речь идёт о современных стандартах языка Фортран.



ные версии стандартов Фортрана (начиная с Фортран-2003) поддерживают новые технологии программирования (объектно-ориентированное и параллельное программирование) [23]. Можно обратить внимание на следующие особенности современных версий *стандарта Фортрана* [23]: шестнадцатитбайтные целые и вещественные числа, тридцатидвухбайтные комплексные числа; массивы переменной длины, конвейерные операции над массивами, реализация параллельных вычислений на уровне стандарта языка – наряду с классическим циклом *do* появился цикл *forall*, который выполняется параллельно [23]. Также в стандарт Фортрана включена технология параллелизации, которая работает в системах как с общей, так и с распределённой памятью – комассивы (coarrays, англ.) [24-32].

Авторами был проведён анализ быстродействия последовательных и параллельных программ решения задач на C/C++ и Фортране [23, 28-31]. Было выявлено [23, 28-31], что скорость работы программы, написанных на Фортране, как минимум не уступает программам, для написания которых использовался язык программирования C/C++. В программах обработки матриц на Фортране используются конвейерные операции, что приводит к значительному ускорению по сравнению с программами на C/C++. Подробнее об этом в работах авторов [23, 28-31]. Современные свободные компиляторы Фортрана gfortran (ver. 7, 8, 9) не уступают по быстродействию широко используемому при программировании вычислительных задач компилятору Intel – ifort [23, 28-31]. К преимуществам компилятора Intel можно отнести собственную проприетарную библиотеку MKL вычислительной математики.

Однако компиляторы Фортрана не поддерживают графический вывод результатов. Для этого необходимо использование сторонних библиотек. Кроме того, для Фортрана нет полноценных библиотек для проведения вычислений высокой точности.

После анализа вышеизложенного было принято решение строить систему моделирования на базе современного свободного компилятора gfortran. Необходимо также создать графическую библиотеку и параллельную библиотеку вычислительной математики. При необходимости использования высокоточных вычислений можно воспользоваться свободной библиотекой mpfr, написанной на C/C++ [33, 34].

Свободная графическая библиотека на языке Фортран

При использовании консольных компиляторов (gfortran, ifort) Фортрана следует учитывать, что отсутствуют средства графического вывода информации. Был проведён анализ возможностей сторонних графических библиотек, результаты которого представлены в [35]. Была разработана универсальная кроссплатформенная библиотека на языке программирования Фортран представления результатов вычислений в графическом виде с использованием свободных графических библиотек OpenGL и FreeGLUT. Библиотека позволяет строить точечные графики, графики двух- и трёх-мерных функций, плоскости в трёхмерном пространстве. После получения изображения, пользователь может управлять положением камеры: смещать камеру по осям, вращать её, масштабировать изображение. Работа представлена авторами на 7-й конференции-конкурсе «Инновационные информационно-педагогиче-

ские технологии в ИТ-образовании» 24-26 ноября 2017 года на ВМК МГУ, а также на тринадцатой конференции «Свободное программное обеспечение в высшей школе» в Переславле-Залесском 26-28 января 2018 года [36]. Главной особенностью этой библиотеки является возможность построения графиков при использовании консольных операционных систем (например, на вычислительных кластерах). Если unix-подобная операционная система не поддерживает графический режим, то библиотека формирует графические изображения в файле, которые можно использовать позже, что позволяет формировать графический результат сразу же при расчётах на вычислительных кластерах. Эта библиотека была использована в разработанной авторами свободной системе математического моделирования SIMFOR.

Библиотеки численного анализа для системы математического моделирования SIMFOR

Ядром системы моделирования является библиотека численного анализа. На Фортране были разработаны следующие последовательные (по возможности с конвейерной реализацией) и параллельные подпрограммы. Ниже представлены прототипы подпрограмм для последовательного варианта, варианты для OpenMP и MPI имеют постфиксы *_omp* и *_mpi* соответственно.

Методы нахождения интеграла:

- **real function cells(nx, ny, ax, bx, ay, by,eps,f) result(res)** – метод ячеек,
- **real function gauss_integrate(a,b,n,p,eps,f) result(res)** – метод Гаусса,
- **real function montekarlo_one(counter, a,b,eps,f) result(res)** – одномерный метод Монте-Карло
- **real function montekarlo_two(counter,ax,bx,ay,by,eps,f) result(res)** – двумерный метод Монте-Карло,
- **real function simpson(a, b, n, eps, f) result(res)** – метод Симпсона,
- **real function left_square(a, b, n, eps, f) result(res)** – метод левых прямоугольников,
- **real function central_square(a,b,n,eps, f) result(res)** – метод средних прямоугольников,
- **real function right_square(a, b, n, eps, f) result(res)** – метод правых прямоугольников.
- *Методы нахождения обратной матрицы:*
- **function invgj(A, n) result(inv)** – метод Гаусса нахождения обратной матрицы,
- **function invslau(A, n) result(inv)** – нахождения обратной матрицы посредством сведения к решению n систем линейных алгебраических уравнений.
- *Методы умножения матриц:*
- **function cannon(i_A, i_B, i_n) result(res)** – метод Кэннона,
- **function cblock(A, B, n, ichunk) result(C)** – блочный алгоритм,
- **function classic(A, B, n) result(C)** – классический метод,
- **function fox(A, B, i_n) result(res)** – метод Фокса.
- Решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений:
 - **function eiler_system_solve_matrix(h,n,matrix,eps) result(res)** – метод Эйлера,
 - **function rk_system_solve_matrix(h,n,matrix,eps)**



- result(res)** – метод Рунге-Кутты,
- **function adams5_system_solve_matrix(h, n, matrix, eps) result(res)** – метод Адамса.
- *Решение систем линейных алгебраических уравнений:*
- **function gauss(a, b, n) result(res)** – метод Гаусса,
- **function jacobi(a, b, n, eps) result(res)** – метод Якоби,
- **function lud(A, b, n) result(res)** – методом LU разложения,
- **function zeidel(A, b, n, eps) result(res)** – метод Зейделя.
- *Решение нелинейных уравнений и систем:*
- **function newton_func_system(func, xstart, eps, n) result(xnew)** – решение системы нелинейных уравнений методом Ньютона.
- *Методы численного дифференцирования*
- **real function d1x_2p_fd_b(x, h, f) result(res)** – метод правосторонней разности через 2 точки,
- **real function d1x_2p_cd_b(x, h, f) result(res)** – метод центральной разности через 2 точки,
- **real function d1x_5p_b(x, h, f) result(res)** – пятиточечный метод численного дифференцирования,
- **real function d2x_5p_b(x, h, f) result(res)** – пятиточечный метод численного дифференцирования для нахождения второй производной,
- **real function d3x_5p_b(x, h, f) result(res)** – пятиточечный метод численного дифференцирования для нахождения третьей производной,
- **real function d4x_5p_b(x, h, f) result(res)** – пятиточечный метод численного дифференцирования для нахождения четвёртой производной.

Библиотека вместе с документацией доступна в архиве по адресу <https://www.github.com/MatSysLib>. Для сборки библиотеки требуются пакеты *gfortran*, *mpich*. Библиотека поддерживает автоматическую сборку с помощью пакета *cmake*.

Библиотеку можно использовать самостоятельно без привязки к системе математического моделирования *SIMFOR*.

Разработка интегрированной среды разработки

Одним из главных требований к разрабатываемой системе – функционирование среды разработки как на локальном компьютере, так и на кластере. В связи с этим, было принято решение строить систему путём расширения функционала текстового редактора Emacs. В состав редактора были добавлены существующие модули:

1. **Ido** – дополнение, которое позволяет осуществлять поиск файлов;
2. **BufferShow** – дополнение, которое позволяет выводить все используемые буферы для удобного переключения между ними.
3. **Autocomplete** – дополнение, которое автоматически предлагает варианты дополнения выражения, которое пишет пользователь.
4. **SpeedBar** – дополнение, которое дает возможность открывать менеджер файлов.
5. **YASnippet** – это система шаблонов для Emacs, для упрощения работы в среде.
6. **Linum** – дополнение, которое предназначено для нумерации строк.

Также был модифицирован модуль подсветки синтаксиса программы. С использованием языка *elisp* были написаны следу-

ющие функции, превратившие текстовый редактор в полноценную интегрированную среду разработки:

1. Функции (*defun compile-cc()*, *defun compile-f()*) позволяющие компилировать код на языках C/C++ и Фортран, кроме того на базе этих функций написан шаблон, с помощью которого пользователь может изменять функционал функций *compile-cc()*, *compile-f()* при необходимости;
2. Функции *compile-f-lib()*, *compile-f-plotter()* предназначены для добавления в строку компиляции необходимых ключей и подключения библиотек.
3. Разработаны функции *send-from-local()* – для рассылки исполняемого файла с локального компьютера и *send-from-cluster()* для отправки с узла кластера на оставшиеся узлы;
4. Написаны функции (*run-program()*, *run-plotter()*, *run-program-cluster()*) для запуска разрабатываемых приложений на кластере.

Сборка системы

Для сборки и установки системы моделирования из разработанных авторами библиотек и модулей, было разработано специализированное программное обеспечение, которое собирает и добавляет библиотеки параллельных алгоритмов численного анализа и вывода графики в текстовый редактор Emacs, преобразует редактор Emacs в специализированную интегрированную среду разработки. Система моделирования SIMFOR может быть установлена на локальный ПК и вычислительный кластер.

Заключение

Была разработана свободная расширяемая система математического моделирования SIMFOR, включающая в себя:

- интегрированную среду разработки, построенную на основе текстового редактора Emacs;
- библиотеку последовательных и параллельных алгоритмов численного анализа;
- библиотеку графического вывода результатов;
- скрипт, осуществляющий сборку библиотек из исходных кодов и установку системы на локальный компьютер или вычислительный кластер; если в операционной системе не установлено необходимое для работы программное обеспечение (компиляторы *gfortran*, *g++*, *gfortran*, библиотеки *FreeGlut*, *OpenGL*, *Mpich*, текстовый редактор Emacs, утилиты) скрипт скачивает из репозитория вашей ОС и официальных сайтов разработчиков необходимое ПО и разворачивает систему моделирования SIMFOR.

Для функционирования системы моделирования SIMFOR в системе должны быть установлены компиляторы и свободные библиотеки *FreeGlut*, *OpenGL*, *Mpich*. При необходимости система может использовать и проприетарные компиляторы компании Intel *icc*, *icpc*, *ifort*.

Разработчик системы специализированной системы моделирования (или простого задачи вычислительной математики) при работе с SIMFOR может использовать всю мощь современного Фортрана и подпрограммы из разработанных авторами библиотек численного анализа и графического вывода результатов.

Разработанная система ориентирована работу с любыми



linux-подобными операционными системами. В данный момент прошло тестирование системы на ОС Ubuntu, Mint, Debian. Область применения системы – разработка специализированных программных комплексов, требующих большого количества вычислений.

Ещё одна область, где имеет смысл использовать систему – учебный процесс. Существует проблема выбора программного обеспечения для приобретения практических навыков при обучении студентов инженерных направлений, будущих физиков, биологов, химиков, математиков численным методам вычислительной математике и основам параллельного программирования. Конечно, проблему можно решить, используя современные свободные и проприетарные математические пакеты (Matlab, Scilab, Maxima, Mathematica, Octave и др.). Тем более, что многие из них содержат модули, позволяющие проводить вычисления с использованием современных технологий параллельного программирования. Но в этом случае мы отдаляем практику применения численных методов от вычислительных алгоритмов. Другим подходом является использование специализированных программных комплексов, в которых студенту понадобятся навыки программирования и знание вычислительных алгоритмов [37]. Авторы считают, что SIMFOR также может быть использован для обучения студентов вычислительной математике, численным методам и параллельному программированию.

Сейчас проходит адаптация системы под отечественные ОС – BaseAlt, Rosa, Astra. В систему могут быть добавлены необходимые библиотеки на Фортране и C/C++ с открытым исходным кодом. Инструкцию по работе с системой, её функционированию и расширению входит в состав системы моделирования SIMFOR, которая свободно доступна на сайте <https://www.github.com/MatSysLib>.

Список использованных источников

- [1] Alexeev E. R., Rychkov S. L., Shatrov A. V. High-performance calculations for modeling of processes of transfer of pollution in an atmospheric boundary layer from superficial sources // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2254. Pp. 131-138. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2254/10000131.pdf> (дата обращения: 10.08.2019).
- [2] Зайцева Н. В. Математическое моделирование краевой задачи для эллиптического уравнения с оператором Бесселя в системе компьютерной математики Maple // Фундаментальные исследования. 2016. № 4-1. С. 41-46. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25953299> (дата обращения: 10.08.2019).
- [3] Зарянкин А. Е., Падашмоганло Т. Разработка и исследование гасителей неравномерности в трубопроводных системах и трактах турбомашин на основе математического моделирования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 1-2. С. 93-110. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-93-110
- [4] Козинев Е. А., Линева А. В., Волокитин В. Д., Иванченко М. В., Мееров И. Б., Денисов С. В. Параллельный алгоритм исследования динамики открытых квантовых систем: решение основного кинетического уравнения в базе обобщенных матриц Гелл-Манна // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2019). Челябинск: ЮУрГУ, 2019. С. 263-274. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37327272> (дата обращения: 10.08.2019).
- [5] Панова Е. А., Бастраков С. И., Ефименко Е. С., Волокитин В. Д., Гоносков А. А., Мееров И. Б. Параллельная реализация псевдоспектрального решателя уравнений Максвелла // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2019). Челябинск: ЮУрГУ, 2019. С. 263-274. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37327283> (дата обращения: 10.08.2019).
- [6] Пирова А. Ю., Мееров И. Б., Козинев Е. А. Программный комплекс DMORSy для переупорядочения разреженных матриц на кластерных системах // Суперкомпьютерные дни в России. Труды международной конференции. М.: МГУ, 2018. С. 749-757. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36548928> (дата обращения: 10.08.2019).
- [7] Сохор Ю. Н. Применение coarray Fortran для реализации методов тензорного анализа сетей // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2011). Челябинск: ЮУрГУ, 2011. С. 711. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22641278> (дата обращения: 10.08.2019).
- [8] Степанов М. Ф., Степанов А. М., Михайлова Л. С., Жеронкина А. А. Автоматизированная среда математического моделирования процессов управления нестационарными нелинейными объектами интеллектуальными самоорганизующимися системами управления // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7, № 6. С. 8-14. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25412239> (дата обращения: 10.08.2019).
- [9] Сухинов А. И., Никитина А. В., Чистяков А. Е., Семенов И. С., Семенякина А. А., Хачунц Д. С. Математическое моделирование процессов эвтрофикации в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе // Параллельные Вычислительные Технологии (ПАВТ'2016). Челябинск: ЮУрГУ, 2016. С. 320-333. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25804441> (дата обращения: 10.08.2019).
- [10] Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Савицкий О. А., Никитина А. В., Семенякина А. А. Математическое моделирование излучения акустической антенной на многопроцессорной системе // Параллельные Вычислительные Технологии (ПАВТ'2016). Челябинск: ЮУрГУ, 2016. С. 699-709. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25804518> (дата обращения: 10.08.2019).
- [11] Danilov A. A., Terekhov K. M., Konshin I. N., Vassilevski Yu. V. Parallel Software Platform INMOST: A Framework for Numerical Modeling // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2015. Vol. 2, Issue 4. Pp. 55-66. DOI: 10.14529/jsfi150404
- [12] J alas S., Dornmair I., Lehe R., Vincenti H., Vay J.-L., Kirchen M., Maier A. R. Accurate modeling of plasma acceleration with arbitrary order pseudo-spectral particle-in-cell methods // Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24, Issue 3. Pp. 033115. DOI: 10.1063/1.4978569
- [13] Kouetcha D. N., Ramézani H., Cohaut N. Ultrafast scalable parallel algorithm for the radial distribution function histogramming using MPI maps // The Journal of Supercomputing. 2017. Vol. 73, Issue 4. Pp. 1629-1653. DOI: 10.1007/s11227-016-1854-0
- [14] L aptyeva T. V., Kozinov E. A., Meyerov I. B., Ivanchenko M. V., Denisov S. V., Hänggi P. Calculating Floquet states of large quantum systems: A parallelization strategy and its cluster



- implementation // Computer Physics Communications. 2016. Vol. 201. P. 85-94. DOI: 10.1016/j.cpc.2015.12.024
- [15] LaSalle D., Karypis G. Efficient Nested Dissection for Multicore Architectures // Euro-Par 2015: Parallel Processing. Euro-Par 2015 / J. Träff, S. Hunold, F. Versaci (eds) Lecture Notes in Computer Science. Vol. 9233. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. Pp. 467-478. DOI: 10.1007/978-3-662-48096-0_36
- [16] Mirams G. R., Arthurs C. J., Bernabeu M. O., Bordas R., Cooper J., Corrias A. et al. Chaste: An Open Source C++ Library for Computational Physiology and Biology // PLOS Computational Biology. 2013. Vol. 9, No. 3. Pp. e1002970. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1002970
- [17] Pravdin S., Ushenin K., Sozykin A., Solovyova O. Human Heart Simulation Software for Parallel Computing Systems // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 66. Pp. 402-411. DOI: 10.1016/j.procs.2015.11.046
- [18] Аненков А. Д. Методы реализации односторонних обменов стандарта MPI // Обработка информации и математическое моделирование. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2017. С. 277-287. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29796791> (дата обращения: 10.08.2019).
- [19] Арчимбаев А. С. Анализ эффективности односторонних и двусторонних MPI-обменов на примере умножения матриц // Обработка информации и математическое моделирование. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2017. С. 288-294. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29796795> (дата обращения: 10.08.2019).
- [20] Кадыров П. А. Сравнение ускорения параллельной версии алгоритма битонной сортировки на архитектуре CUDA и стандарте MPI // Мировая наука. 2017, № 3. С. 29-32. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29818718> (дата обращения: 10.08.2019).
- [21] Pirova A., Meyerov I., Kozinov E., Lebedev S. PMORSy: parallel sparse matrix ordering software for fill-in minimization // Optimization Methods and Software. 2017. Vol. 32, No. 2. Pp. 274-289. DOI: 10.1080/10556788.2016.1193177
- [22] Pirova A., Meyerov I. MORsy – a new tool for sparse matrix reordering // An International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization / M. Papadrakakis, M. G. Karlaftis, N. D. Lagaros (Eds.) Kos Island, Greece, 4-6 June 2014. Kos Island, 2014. Pp. 1952-1964. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24006757> (дата обращения: 10.08.2019).
- [23] Алексеев Е. Р., Соболева О. В. Современный язык программирования Фортран в образовании и научных исследованиях // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. Т. 12, № 4. С. 110-116. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28151067> (дата обращения: 10.08.2019).
- [24] Горелик А. М. Программирование на современном Фортране. М.: Финансы и статистика, 2006.
- [25] Горелик А. М. Сравнение стандартов языка Фортран // Информационные технологии и вычислительные системы. 2015. № 3. С. 45-64. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25032419> (дата обращения: 10.08.2019).
- [26] Горелик А. М. Эволюция языка Фортран. Устаревшие черты языка и средства для их замены // Принты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 130. С. 1-13. DOI: 10.20948/prepr-2018-130
- [27] Маркус А. Современный Фортран на практике. М: ДМК-Пресс, 2015.
- [28] Алексеев Е. Р., Демин П. А., Болтачева Н. Ю. Новые технологии разработки высокоэффективных и параллельных приложений на современном Фортране // Прикладная информатика. 2018. Т. 13, № 1. С. 103-120. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32601828> (дата обращения: 10.08.2019).
- [29] Алексеев Е. Р., Демин П. А., Лутошкин Д. А., Стародумов В. В. Свободные и проприетарные компиляторы C(C++) и Фортрана при разработке эффективных вычислительных приложений // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13, № 4. С. 232-240. DOI: 10.25559/SITITO.2017.4.446
- [30] Алексеев Е., Лутошкин Д., Огородов А, Стародумов В. Использование компиляторов языка Фортран при решении вычислительных задач // Тринадцатая конференция «Свободное программное обеспечение в высшей школе»: Сборник материалов конференции, Переславль, 26-28 января 2018 г. Москва, МАКС Пресс, 2018. С. 9-14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32528474> (дата обращения: 10.08.2019).
- [31] Демин П. А., Алексеев Е. Р. Матричные операции языка Fortran // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017), сборник статей Всерос. ежегод. науч.-практ. конф., 1-29 апреля 2017 г. Киров: ВятГУ, 2017. С. 979-990. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32630537> (дата обращения: 10.08.2019).
- [32] Уванов М. И., Красноуццкий Д. А. О создании многопоточкового приложения в Фортран 90 для распараллеливания выполнения процедур // Наука. Промышленность. Оборона. Труды XVI Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию Победы Великой Отечественной войне. Новосибирск: НГТУ, 2015. С. 786-790. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24084273> (дата обращения: 10.08.2019).
- [33] Алексеев Е. Р., Демин П. А. Применение библиотек произвольной точности в вычислительных задачах // Общество. Наука. Инновации (НПК – 2016). Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 18-29 апреля 2016 г. Киров: ВятГУ, 2016. С. 2670-2677. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26898214> (дата обращения: 10.08.2019).
- [34] Горелик А. М. Смешанное программирование на Фортране и Си // Информационные технологии и вычислительные системы. 2016. № 2. С. 62-67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26336696> (дата обращения: 10.08.2019).
- [35] Алексеев Е. Р., Демин П. А., Костюк Д. А. Возможности графического вывода результатов в последовательных и параллельных кроссплатформенных вычислительных приложениях на Фортране и C(C++) // Advanced science. 2017, № 3. С. 143-167. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30450009> (дата обращения: 10.08.2019).
- [36] Алексеев Е., Лутошкин Д., Стародумов В. Разработка кроссплатформенных библиотек на языке Fortran и C++ построения графиков функций // Тринадцатая конференция «Свободное программное обеспече-



ние в высшей школе»: Сборник материалов конференции, Переславль, 26-28 января 2018 г. М.: МАКС Пресс, 2018. С. 15-19. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32528475> (дата обращения: 10.08.2019).

- [37] Гергель В. П., Козинев Е. А., Линева А. В., Штанюк А. А. Учебно-исследовательские системы для изучения параллельных методов // CEUR Workshop Proceedings. 2015. Т. 1482. С. 779-786. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1482/779.pdf> (дата обращения: 10.08.2019).

Поступила 10.08.2019; принята к публикации 23.10.2019;
опубликована онлайн 23.12.2019.

Об авторах:

Алексеев Евгений Ростиславович, доцент кафедры информационных образовательных технологий, Кубанский государственный университет (350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3844-4398>, er.alekseev@yandex.ru

Лутошкин Денис Александрович, магистрант, Вятский государственный университет (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0060-5707>, disa1995@mail.ru

Стародумов Вячеслав Владимирович, магистрант, Вятский государственный университет (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1705-1010>, WStarD@citydom.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Alexeev E.R., Rychkov S.L., Shatrov A.V. High-performance calculations for modeling of processes of transfer of pollution in an atmospheric boundary layer from superficial sources. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018; 2254:131-138. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2254/10000131.pdf> (accessed 10.08.2019). (In Eng.)
- [2] Zaytseva N.V. Mathematical modeling boundary-value problem for elliptic equation with Bessel operator in the program Maple. *Fundamental research*. 2016; (4-1):41-46. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25953299> (accessed 10.08.2019). (In Russ. abstract in Eng.)
- [3] Zaryankin A.E., Padashmoghlanlo T. Development and research of vibration irregularity in piping systems and paths of turbomachines on the basis of mathematical modeling. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems*. 2019; 21(1-2):93-110. (In Russ. abstract in Eng.) DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-93-110
- [4] Kozinov E.A., Lineva A.V., Volokitin V.D., Ivanchenko M.V., Meerov I.B., Denisov S.V. *Parallel'nyj algoritm issledovaniya dinamiki otkrytykh kvantovykh sistem: reshenie osnovnogo kineticheskogo uravneniya v bazise obobshchennykh matric Gell-Manna* [A parallel algorithm for studying the dynamics of open quantum systems: solving the basic kinetic equation in the basis of generalized Gell-Mann matrices]. In: *Parallel computational technologies (PCT'2019)*. SUSU, Chelyabinsk, 2019, pp. 263-274. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37327272> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [5] Panova E.A., Bastrakov S.I., Efimenko E.S., Volokitin V.D., Gonoskov A.A., Meerov I.B. *Parallel'naya realizaciya pseudospektral'nogo reshatelya uravnenij Maksvelly* [Parallel implementation of the pseudo-spectral solver of Maxwell's equations]. In: *Parallel computational technologies (PCT'2019)*. SUSU, Chelyabinsk, 2019, pp. 263-274. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37327283> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [6] Pirova A.YU., Meerov I.B., Kozinov E.A. *Programmnyj kompleks DMORSy dlya pereuporyadocheniya razrezhennykh matric na klasternykh sistemah* [DMORSy software package for reordering sparse matrices on cluster systems]. In: *Russian Supercomputing Days 2018*. MSU, Moscow, 2018, pp. 749-757. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36548928> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [7] Sohor Yu.N. *Primenenie coarray Fortran dlya realizacii metodov tenzornogo analiza setej* [Using coarray Fortran to implement tensor network analysis methods]. In: *Parallel computational technologies (PCT'2011)*. SUSU, Chelyabinsk, 2011, p. 711. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22641278> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [8] Stepanov M.F., Stepanov A.M., Mikhailova L.S., Jeronkina A.A. The automated system of mathematical modelling of control processes of non-stationary nonlinear plants by intellectual selforganized control systems. *H&ES Research*. 2015; 7(6):8-14. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25412239> (accessed 10.08.2019). (In Russ. abstract in Eng.)
- [9] Suhinov A.I., Nikitina A.V., Chistyakov A.E., Semenov I.S., Semenyakina A.A., Hachunc D.S. *Matematicheskoe modelirovanie processov evtrofikacii v melkovodnykh vodoemah na mnogoprocessornoj vychislitel'noj sisteme* [Mathematical modeling of eutrophication processes in shallow water bodies on a multiprocessor computing system]. In: *Parallel computational technologies (PCT'2016)*. SUSU, Chelyabinsk, 2016, pp. 320-333. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25804441> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [10] Suhinov A.I., Chistyakov A.E., Savickij O.A., Nikitina A.V., Semenyakina A.A. *Matematicheskoe modelirovanie izlucheniya akusticheskoy antennoj na mnogoprocessornoj sisteme* [Mathematical modeling of acoustic antenna radiation on a multiprocessor system]. In: *Parallel computational technologies (PCT'2016)*. SUSU, Chelyabinsk, 2016, pp. 699-709. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25804518> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [11] Danilov A.A., Terekhov K.M., Konshin I.N., Vassilevski Yu.V. Parallel Software Platform INMOST: A Framework for Numerical Modeling. *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2015; 2(4):55-66. (In Eng.) DOI: 10.14529/jsfi150404
- [12] J alas S., Dornmair I., Lehe R., Vincenti H., Vay J.-L., Kirchen M., Maier A. R. Accurate modeling of plasma acceleration with arbitrary order pseudo-spectral particle-in-cell methods. *Physics of Plasmas*. 2017; 24(3):033115. (In Eng.) DOI: 10.1063/1.4978569
- [13] Kouetcha D.N., Ramézani H., Cohaut N. Ultrafast scalable parallel algorithm for the radial distribution function histogramming using MPI maps. *The Journal of Supercomputing*. 2017; 73(4):1629-1653. (In Eng.) DOI: 10.1007/s11227-016-1854-0



- [14] Laptyeva T.V., Kozinov E.A., Meyerov I.B., Ivanchenko M.V., Denisov S.V., Hänggi P. Calculating Floquet states of large quantum systems: A parallelization strategy and its cluster implementation. *Computer Physics Communications*. 2016; 201:85-94. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.cpc.2015.12.024
- [15] LaSalle D., Karypis G. Efficient Nested Dissection for Multicore Architectures. In: Träff J., Hunold S., Versaci F. (Eds.) *Euro-Par 2015: Parallel Processing. Euro-Par 2015. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9233. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015, pp. 467-478. (In Eng.) DOI: 10.1007/978-3-662-48096-0_36
- [16] Mirams G.R., Arthurs C.J., Bernabeu M.O., Bordas R., Cooper J., Corrias A. et al. Chaste: An Open Source C++ Library for Computational Physiology and Biology. *PLoS Computational Biology*. 2013; 9(3):e1002970. (In Eng.) DOI: 10.1371/journal.pcbi.1002970
- [17] Pravdin S., Ushenin K., Sozykin A., Solovyova O. Human Heart Simulation Software for Parallel Computing Systems. *Procedia Computer Science*. 2015; 66:402-411. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.procs.2015.11.046
- [18] Anenkov A.D. *Metody realizacii odnostononnih obmenov standarta MPI* [Methods for implementing unilateral MPI standard exchanges]. In: *Information Processing and Mathematical Modeling. Proceedings*. SIBSUTIS, Novosibirsk, 2017, pp. 277-287. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29796791> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [19] ArchimaeV A.S. *Analiz effektivnosti odnostononnih i dvostononnih MPI-obmenov na primere umnozheniya matric* [Analysis of the efficiency of one-way and two-way MPI exchanges using the example of matrix multiplication]. In: *Information Processing and Mathematical Modeling. Proceedings*. SIBSUTIS, Novosibirsk, 2017, pp. 288-294. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29796795> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [20] Kadyrov P.A. Comparison of acceleration the parallel version of the bitonic sort algorithm on the CUDA architecture and MPI standard. *Mirovaya Nauka*. 2017; (3):29-32. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29818718> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [21] Pirova A., Meyerov I., Kozinov E., Lebedev S. PMORSy: parallel sparse matrix ordering software for fill-in minimization. *Optimization Methods and Software*. 2017; 32(2):274-289. (In Eng.) DOI: 10.1080/10556788.2016.1193177
- [22] Pirova A., Meyerov I. MORSy – a new tool for sparse matrix reordering. In: Papadrakakis M., Karlaftis M.G., Lagaros N.D. (Eds.) *An International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*, Kos Island, Greece, 4-6 June 2014. Kos Island, 2014, pp. 1952-1964. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24006757> (accessed 10.08.2019). (In Eng.)
- [23] Alekseev E.R., Soboleva O.V. The Modern Language of Programming Fortran in Education and scientific Research. *Sovremennyye informacionnyye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2016; 12(4):110-116. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28151067> (accessed 10.08.2019). (In Russ. abstract in Eng.)
- [24] Gorelik A.M. *Programmirovaniye na sovremennom Fortrane* [Programming in Modern Fortran]. Finansy i Statistika, Moscow, 2006. (In Russ.)
- [25] Gorelik A.M. The Fortran Standards Comparison. *Informacionnyye tekhnologii i vichislitel'nyye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2015; (3):45-64. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25032419> (accessed 10.08.2019). (In Eng.)
- [26] Gorelik A.M. Evolution of the Fortran language. Decremental features of the language and means for their replacement. *Keldysh Institute PREPRINTS*. 2018; (130):1-13. (In Eng.) DOI: 10.20948/prepr-2018-130
- [27] Markus A. *Modern Fortran in Practice*. Cambridge University Press, 2012. (In Eng.)
- [28] Alekseev E., Demin P., Boltacheva N. New technologies for developing high-performance and parallel applications on modern Fortran. *Journal of Applied Informatics*. 2018; 13(1):103-120. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32601828> (accessed 10.08.2019). (In Russ. abstract in Eng.)
- [29] Alekseev E.R., Demin P.A., Lutoshkin D.A., Starodumov V.V. The Free and Proprietary Compilers C(C++) and Fortran at Development of Effective Computing Applications. *Sovremennyye informacionnyye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017; 13(4):232-240. (In Russ. abstract in Eng.) DOI: 10.25559/SITITO.2017.4.446
- [30] Alekseev E., Lutoshkin D., Ogorodov A., Starodumov V. *Ispol'zovanie kompilyatorov yazyka Fortran pri reshenii vychislitel'nykh zadach* [Using Fortran Language Compilers For Solving Computational Problems]. In: *Free Software in High School. Proceedings*. MAKSS Press, Moscow, 2018, pp. 9-14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32528474> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [31] Demin P.A., Alekseev E.R. *Matrichnyye operacii yazyka Fortran* [Fortran Matrix Operations]. In: *Society. The science. Innovation (NPK-2017). Proceedings*. VyatSU, Kirov, 2017, pp. 979-990. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32630537> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [32] Uvanov M.I., Krasnoruckiy D.A. O sozdanii mnogopotokovogo prilozheniya v Fortran 90 dlya rasparrallelivaniya vpolneniya procedur [About creating a multi-threaded application in Fortran 90 for parallelizing the execution of procedures]. In: *The Science. Industry. Defense. Proceedings*. NSTU, Novosibirsk, 2015, pp. 786-790. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24084273> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [33] Alekseev E.R., Demin P.A. *Primeneniye bibliotek proizvol'noj tochnosti v vychislitel'nykh zadachah* [The use of libraries of arbitrary accuracy in computational problems]. In: *Society. The science. Innovation (NPK-2016). Proceedings*. VyatSU, Kirov, 2016, pp. 2670-2677. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26898214> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [34] Gorelik A.M. Mixed Language Programming for Fortran and C. *Informacionnyye tekhnologii i vichislitel'nyye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2016; (2):62-67. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26336696> (accessed 10.08.2019). (In Russ. abstract in Eng.)
- [35] Alekseev E.R., Demin P.A., Kostyuk D.A. *Vozmozhnosti graficheskogo vyvoda rezul'tatov v posledovatel'nykh i paralel'nykh krossplatformennykh vychislitel'nykh prilozheniyah*



- na Fortrane i S(S++)* [Possibilities of graphical conclusion of results in sequential and parallel cross-platform computer applications on Fortran and C(C++)]. *Advanced science*. 2017; (3):143-167. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30450009> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [36] Alekseev E., Lutoshkin D., Starodumov V. *Razrabotka krossplatformennykh bibliotek na yazyke Fortran i S++ postroyeniya grafikov funktsij* [Development of cross-platform libraries in Fortran and C++ for graphing functions]. In: *Free Software in High School. Proceedings*. MAKS Press, Moscow, 2018, pp. 15-19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32528475> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)
- [37] Gergel V.P., Kozinov E.A., Linev A.V., Shtanyuk A.A. *Uchebno-issledovatel'skie sistemy dlya izucheniya parallelnykh metodov* [Educational and Research Systems for Studying of Parallel Methods]. *CEUR Workshop Proceedings*. 2015; 1482:779-786. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-1482/779.pdf> (accessed 10.08.2019). (In Russ.)

*Submitted 10.08.2019; revised 23.10.2019;
published online 23.12.2019.*

About the authors:

Evgeniy R. Alekseev, Associate Professor of the Department of Information Educational Technologies, Kuban State University (149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russia), Ph.D. (Technology), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3844-4398>, er.alekseev@yandex.ru

Denus A. Lutoshkin, Master's degree student, Vyatka State University (36 Moskovskaya Str., Kirov 610000, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0060-5707>, disa1995@mail.ru

Vyacheslav V. Starodumov, Master's degree student, Vyatka State University (36 Moskovskaya Str., Kirov 610000, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1705-1010>, WStarD@citydom.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

