

ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ



ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СИСТЕМНОЕ
ПРОГРАММИРОВАНИЕ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

2
—
2018

ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ № 2 (39) 2018 г.

Журнал выходит ежеквартально, издается с 2008 г.

Соучредители журнала — Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК.

Редакционный совет

Председатель — акад. НАН РК М. Н. Калимолдаев,

Акад. РАН А. Л. Асеев, акад. АН РУ Т. Ф. Бекмуратов (Республика Узбекистан), проф.

В. А. Васенин, акад. РАН С. Н. Васильев, проф. В. М. Вишневский, акад. РАН С. С. Гончаров, акад. РАН Ю. Л. Ершов, акад. РАО А. А. Кузнецов, акад. РАН Н. А. Кузнецов, акад. РАН

А. П. Кулешов, проф. Т. П. Любимова, проф. А. Г. Марчук, проф. Б. Я. Рябко, проф.

Н. А. Семенов, акад. РАН И. А. Соколов, проф. А. Н. Сотников, чл.-кор. РАН Ю. А. Флеров, проф. П. С. Чубик, акад. НАН КР Ж. Ш. Шаршеналиев (Кыргызская Республика).

Редколлегия

Главный редактор — проф. В. Э. Малышкин,

Д. Ж. Ахмед-Заки, А. Г. Вострецов, В. П. Гергель, Б. С. Гольдштейн, В. И. Гужов,

Ю. А. Загорулько, С. Д. Каракозов, М. М. Каримов, В. Н. Касьянов, А. В. Кельманов,

О. В. Кибис, В. В. Корнеев, И. В. Котенко, Т. П. Любимова, А. И. Ляхов, М. А. Марченко,

В. В. Окольнишников, Б. В. Поллер, А. С. Родионов (зам. гл. редактора), Б. Б. Сахариев,

Ю. Г. Соловейчик, М. А. Сонькин, В. В. Шахов (зам. гл. редактора), М. С. Хайретдинов, Ph. D. Moonseong Kim (Korea), Prof. Dr.-Eng. V. D. Nguyen (Vietnam), Michele Pagano (Italy).

Редакция: отв. секретарь М. С. Решетинская, зам. гл. редактора по эл. версии журнала С. В. Ломакин, верстка Д. В. Лазуткин, логист Л. В. Трофимова.

Адрес редакции: 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 6, ИВМ и МГ СО РАН тел. (383) 330-96-43; e-mail: problem-info@sscc.ru, <http://www.problem-info.sscc.ru>.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия. Свидетельство ПИ № ФС77-32088 от 27 мая 2008 г.

Подписной индекс в каталоге „Издания органов научно-технической информации“
ОАО «Агентство „Роспечать“» — 69980.

Все права авторов сохранены. Использование материалов журнала возможно только с разрешения редакции и авторов.

Отпечатано в типографии ТОО „Инфо-Алдин“. Адрес: 050009, г. Алма-Ата, ул. Толе би, д. 188; тел./факс 8 (727) 272-78-26. Формат 60 × 84 1/8. Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Печать офсетная. Тираж 300 экз. Заказ № _____. Подписано в печать _____ г.

© Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 2018

© Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Прикладные информационные технологии

Рубцова Ю. В. Модель нейронной сети для преодоления деградации результатов классификации текстов по тональности 4

Разакова М. Г. Радиолокационные методы дистанционного зондирования лесных массивов 15

Бредихин С. В., Ляпунов В. М., Щербакова Н. Г. Спектральный анализ сети цитирования научных журналов 24

Параллельное системное программирование и вычислительные технологии

Благодарный А. И. Программный инструментарий для построения систем автоматизированного управления в среде отечественной операционной системы 41

Куликов И. М., Черных И. Г. GooPhi: новый код для моделирования астрофизических течений на суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi 52

Правила представления и подготовки рукописей для публикации
в журнале „ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ“ 75

CONTENTS

Applied information technologies

<i>Rubtsova Y. V.</i> Neural network model for overcoming time gap of sentiment classification ..	4
<i>Razakova M. G.</i> Radar remote sensing methods of forest cover	15
<i>Bredikhin S. V., Lyapunov V. M., Shcherbakova N. G.</i> Spectral analysis of the journal citation network	24

Parallel system programming and computational technologies

<i>Blagodarniy A. I.</i> Software tools for building automated control systems in the environment of the domestic operating system	41
<i>Kulikov I. M., Chernykh I. G.</i> GooPhi: a new code for numerical modeling of astrophysical flows on Intel Xeon Phi supercomputers	52
Rules of presentation and preparation of manuscripts offered for publication	75

PROBLEMS OF INFORMATICS
N 2(39) 2018

NEURAL NETWORK MODEL FOR OVERCOMING TIME GAP OF SENTIMENT CLASSIFICATION

Y. V. Rubtsova

A. P. Ershov Institute of Informatics Systems, Novosibirsk State University,
630090, Novosibirsk, Russia

This paper presents a neural network model to improve sentiment classification in dynamically updated text collections in natural language. As social networks are constantly updated by users there is essential to take into account new jargons, crucial discussed topics while solving classification task. Therefore neural network model for solution this problem is suggested along with supervised machine learning method and unsupervised machine learning method all of them were used for sentiment analysis. It was shown in the paper that the quality of text classification by sentiment is reduced up to 15 % according to F-measure over one and a half year. Therefore the aim of the approach is to minimise the decrease according to F-measure while classifying text collections that are spaced over time. Experiments were made on sufficiently representative text collections, which were briefly described in the paper.

Automatic sentiment classification is rather a topical subject. The great amount of information contained in social networks is represented as text in natural language. Therefore it is requires computational linguistics methods to proceed all this information. Over the about past ten years, a lot of researcher worldwide were involved in the task of automatically extracting and analysing the texts of social media. Moreover as one of the main tasks was considered the problem of sentiment classification of texts in natural language.

Researches and experiments on automatic text classification show that the final results of classification highly depend on the training text set and also the subject are that the training collection corresponds to. Great amount of projects centred on feature engineering and the involvement of additional data, such as external text collections (that do not overlap with the training collection) or sentiment vocabulary. Additional information can reduce the reliance on the training collection and improve classification results. In order to successfully classify texts by sentiment, it is necessary to have tagged by sentiment text collections. Moreover, in order to improve sentiment classification in dynamically updated text collections, it is necessary to have several collections identical by their properties, compiled in different periods of time.

The prepared text collections formed the basis for training and test collections of Twitter posts used to assess the sentiments of tweets towards a given subject at classifier competition at SentiRuEval in 2015 and 2016. It was shown that the collections are complete and sufficiently representative.

Previously author shows quite good results of the models builded on feature space for training the classifier based on the training collection and is therefore highly dependent on the quality and completeness of this collection. Described above, there are no semantic relationships between the terms, and the addition of new terms leads to an increase in the dimension of feature vectorspace. Another way to overcome the obsolescence of a lexicon is the use of the distributed word representations as features to train the classifier. So this paper was focused on distributed word representations.

In the basis of this approach is the concept of a distributed word representation and the Skip-gram neural language model. External resources were used here. The distributed word representations space was built on an untagged collection of tweets gathered in 2013 that was many times larger than the automatically tagged training collection. It is important to mention that the length of the vector space

was only 300 this is the first advantage of the approach. A second advantage of this approach is the classification results: the difference between

Collection of 2013 and of 2015 years is 0.26 % according to F-measure.

In summary, proposed approached can reduce the deterioration of sentiment classification results for collections staggered over time.

Key words: natural language processing, sentiment analysis, sentiment classification, machine learning.

References

1. Loukachevitch N. et al. SentiRuEval: testing object-oriented sentiment analysis systems in Russian // Proceedings of International Conference Dialog. 2015. P. 3–9.
2. Loukachevitch N., Rubtsova Y. Entity-Oriented Sentiment Analysis of Tweets: Results and Problems // Text, Speech, and Dialogue. Springer International Publishing, 2015. P. 551–559.
3. Chetviorkin I., Braslavskiy P., Loukachevitch N. Sentiment Analysis Track at ROMIP 2011 // Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Annual International Conf. „Dialogue“, CoLing&InTel. N 11 (18). 2012. P. 739–746.
4. Chetviorkin I., Loukachevich N. 2013. Sentiment analysis track at romip 2012 // In Proceedings of International Conference Dialog. V. 2. 2012. P. 40–50.
5. Amigó E. et al. Overview of RepLab 2012: Evaluating Online Reputation Management Systems // CLEF (Online Working Notes/Labs/Workshop). 2012.
6. Amigó E. et al. Overview of replab 2013: Evaluating online reputation monitoring systems // International Conference of the Cross-Language Evaluation Forum for European Languages. Springer Berlin Heidelberg. 2013. P. 333–352.
7. Loukachevitch, N., Rubtsova, Y. SentiRuEval-2016: Overcoming Time Gap and Data Sparsity in Tweet Sentiment Analysis // In Proceedings of International Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialog-2016. 2016. P. 375–384.
8. Rosenthal, S., Farra, N., & Nakov, P. SemEval-2017 task 4: Sentiment analysis in Twitter // In Proceedings of the 11th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2017). 2017. P. 502–518.
9. Pang B., Lee L., Vaithyanathan S. Thumbs up?: sentiment classification using machine learning techniques // Proceedings of the ACL-02 conference on Empirical methods in natural language processing. V. 10. Association for Computational Linguistics, 2002. P. 79–86.
10. Turney P. D. Thumbs up or thumbs down?: semantic orientation applied to unsupervised classification of reviews // Proceedings of the 40th annual meeting on association for computational linguistics. Association for Computational Linguistics, 2002. P. 417–424.
11. Wilson T., Wiebe J., Hoffmann P. Recognizing contextual polarity in phrase-level sentiment analysis // Proceedings of the conference on human language technology and empirical methods in natural language processing. Association for Computational Linguistics, 2005. P. 347–354.
12. Jiang L. et al. Target-dependent twitter sentiment classification // Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. V. 1. Association for Computational Linguistics, 2011. P. 151–160.
13. Lukashevich N., Rubtsova Yu. Ob“ektno-orientirovannyj analiz tvitov po tonal’nosti: rezul’taty i problemy // Trudy Mezhdunarodnoj konferencii DAMDID/RCDL-2015. Odninsk, 2015. S. 499–507.
14. Klekovina M. V., Kotel’nikov E. V. Metod avtomaticheskoy klassifikacii tekstov po tonal’nosti, osnovannyj na slovare ehmocional’noj leksiki // Trudy konferencii RCDL. 2012. S. 118–123.
15. Read J. Using emoticons to reduce dependency in machine learning techniques for sentiment classification // In Proceedings of ACL-05, 43nd Meeting of the Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics, 2005.

16. Rubtsova Yu. V. Metod postroeniya i analiza korpusa korotkih tekstov dlya zadachi klassifikaci i otzyvov // EHlektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tekhnologii, ehlektronnye kollekcii: Trudy XV Vserossijskoj nauchnoj konferencii RCDL'2013, YAroslavl', Rossiya, 14–17 oktyabrya 2013 g. YAroslavl': YArGU, 2013. S. 269–275.
17. Rubtsova Yu. V. Razrabotka i issledovanie predmetnonezavisimogo klassifikatora tekstov po tonal'nosti // Trudy SPIIRAN. 2014. T. 5. N 36. S. 59–77.
18. Rubtsova Yu. V. Avtomaticheskoe postroenie i analiz korpusa korotkih tekstov (postov mikroblogov) dlya zadachi razrabotki i trenirovki tonovogo klassifikatora // Inzheneriyaznanij i tekhnologii semanticheskogo veba. 2012. T. 1. S. 109–116.
19. Rubtsova Y. Reducing the Degradation of Sentiment Analysis for Text Collections Spread over a Period of Time // International Conference on Knowledge Engineering and the Semantic Web. Springer, Cham, 2017. P. 3–13.
20. Rubtsova Y. Preodolenie degradacii rezul'tatov klassifikacii tekstov po tonal'nosti v kollekcijah, raznesennyh vo vremeni // Sistemnaya informatika. 2016. S. 45–68.
21. Titov, I. Modeling Online Reviews with Multi-grain Topic Models // Proceedings of the 17th International Conference on World Wide Web (WWW'08). 2008. P. 111–120.
22. Levy, O. Improving Distributional Similarity with Lessons Learned from Word Em-beddings // Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2015. P. 211–225.
23. Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv preprint arXiv: 1301.3781. 2013.
24. Mikolov T., Sutskever I., Chen K., Corrado G., and Dean J. Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality // In Proceedings of NIPS, 2013. P. 3111–3119.



МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ ПО ТОНАЛЬНОСТИ

Ю. В. Рубцова

Институт систем информатики СО РАН,
Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 004.912

В данной работе описан алгоритм построения классификатора текстов по тональности, использующий пространство распределенных представлений слов и нейронную языковую модель Skip-gram. Экспериментально показано, что построенная модель классификатора текстов может быть перенесена на коллекции, собранные в другой временной промежуток без потери качества классификации.

Ключевые слова: анализ тональности, классификация текстов, машинное обучение.

Введение. В сети Интернет содержится огромное количество текстовой информации. Большая часть информации представлена в неструктурированном виде на естественном языке, что усложняет ее обработку. Попытки структурировать информацию и извлечь из нее пользу интересны как коммерческому сектору, так и исследователям. Поэтому за последние несколько лет увеличилось количество исследований, посвященных лингвистическим задачам. Также возросло число программных систем, которые извлекают факты из неструктурированных массивов текстовой информации, классифицируют и кластеризируют информацию. Разрабатываются системы, нацеленные как на анализ самих сообщений в сети, так и на выявление источников распространяемой информации и лидеров мнений. В настоящее время задачей автоматического извлечения и анализа отзывов и мнений из социальных медиа занимается достаточно большое количество ученых и исследователей по всему миру. Одной из главных решаемых задач рассматривается задача классификации текстов по тональности.

Тема автоматической классификации текстов по тональности актуальна в России и за рубежом. Ежегодно проводятся соревнования систем и программных комплексов по автоматической классификации текстов по тональности [1–8].

Классификация текстовых документов по тональности на разных уровнях исследуется в трудах российских и зарубежных ученых. Классификация на уровне всего документа целиком описывается в работах [9, 10]. Чуть позже классификацию на уровне коротких фраз и выражений, а не на уровне абзацев или целых документов, проводили Wilson, Wiebe и Hoffmann [11]. Еще один вид классификации текстов — это классификация относительно заданного объекта. В одном тексте может быть упомянуто несколько сущностей, и автор сообщения может высказывать различные мнения относительно каждой из упомянутых сущностей, поэтому стала актуальной задача анализа тональности по отношению к заданным объектам, упомянутым в тексте [2, 5, 7, 12–14].

Однако, практически все исследования сводятся к построению и оценке классификаторов на текстовых коллекциях, собранных в один временной промежуток, не рассматриваются на текстовых коллекциях, собранных в разные временные интервалы. В этой работе приводятся алгоритм и результаты работы классификатора, который был обучен на текстовой коллекции, собранной в 2013 году, и протестированный на коллекциях, собранных в 2014 и 2015 годах. Предложен метод выделения признаков, основанный на нейронной сети, который показал стабильные результаты на всех текстовых коллекциях, разнесенных во времени.

1. Текстовые коллекции. Исследования по автоматической классификации текстов показывают, что результаты классификации, как правило, зависят от обучающей текстовой выборки и предметной области, к которой относится обучающая коллекция. Классификатор может показывать отличные результаты на одной коллекции текстов и совершенно не справиться с такой же задачей на другой коллекции.

Для качественного решения задачи классификации текстов по тональности необходимо иметь размеченные коллекции текстов. Более того, для решения задачи улучшения классификации по тональности в динамически обновляемых коллекциях, необходимо иметь несколько текстовых коллекций, которые были собраны в разные временные промежутки.

Сбор первого корпуса текстов проходил в декабре 2013 года — феврале 2014 года, для краткости будем называть ее коллекцией 2013 года. В соответствии с письменным обозначением эмоций был произведен поиск позитивно и негативно окрашенных сообщений. Таким образом, из коллекции 2013 года сформировано две коллекции: коллекция положительных твитов и коллекция негативных твитов. Нейтральная коллекция была сформирована из сообщений новостных и официальных аккаунтов twitter. С помощью метода [15] и предложенной автором фильтрации [16] из текстов 2013 года была сформирована обучающая коллекция.

Сбор второго корпуса, который состоит из около 10 миллионов коротких сообщений, проходил в июле-августе 2014 года. Третий корпус, состоящий из около 20 млн. сообщений, был собран в июле и ноябре 2015 года.

Из текстов 2014 и 2015 гг. сформированы две тестовые коллекции. Тексты 2014 и 2015 годов подверглись идентичной фильтрации, что и обучающая коллекция 2013 года. Формирование тестовых коллекций по классам тональности происходило аналогично обучающей коллекции. Распределение количества сообщений по классам тональности в коллекциях представлено в табл. 1. Все три коллекции являются предметно независимыми, то есть не относятся ни к какой заранее определенной предметной области.

Ранее в работах [17, 18] автором было показано, что собранные коллекции являются полными и достаточно представительными.

2. Использование распределенных представлений слов в качестве признаков. В предыдущих работах [19, 20] было показано, что если пространство признаков для обучения классификатора строится на основе обучающей коллекции, то результаты работы классификатора сильно зависят от качества и полноты этой коллекции. Более того, использование в качестве признаков всех слов, входящих в обучающую коллекцию, приводит к тому, что пространство признаков исчисляется сотнями тысяч.

Одним способом преодоления устаревания лексикона является использование пространства распределенных представлений слов в качестве признаков для обучения классификатора текстов по тональности.

Таблица 1

Распределение сообщений в коллекциях по классам тональности

	Положительные сообщения	Отрицательные сообщения	Нейтральные сообщения
2013 год	114 911	111 922	107 990
2014 год	5 000	5 000	4 293
2015 год	10 000	10 000	9 595

3. Пространство распределенных представлений слов. *Распределенное представление слова* (англ. distributed word representation, word embedding) — это k -мерный вектор признаков $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_k)$, где $w_i \in R$ — это компоненты вектора [21]. Количество координат k такого вектора существенно меньше. Обычно это число не превосходит нескольких сотен, соответственно, пространство признаков имеет сравнительно небольшую размерность.

Основная идея векторного распределенного представления слов заключается в нахождении связей между контекстами слов. Идея заключается в том, что находящиеся в похожих контекстах слова, скорее всего, означают или описывают похожие предметы или явления, т. е. являются семантически схожими. Для этого каждый термин представляется в виде вектора из k координат, в которых закодированы полезные признаки, характеризующие этот термин и позволяющие определять сходство этого термина с похожими терминами в коллекции. Формально представление терминов является задачей максимизации косинусной близости между векторами слов, которые появляются рядом друг с другом в близких контекстах, и минимизация косинусной близости между векторами слов, которые не появляются в близких контекстах. Косинусная мера близости между векторами, $\cos(\theta)$, может быть представлена следующим образом (формула 1):

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i)^2}}, \quad (1)$$

где A_i и B_i — координаты векторов **A** и **B** соответственно.

Помимо сокращения размерности вектора признаков, распределенное представление слов учитывает смысл слова в контексте. То есть распределенное представление слов позволяет обобщить, например, „быстрый автомобиль“ на отсутствующее в обучающей выборке „шустрая машина“, что позволяет снизить зависимость от обучающей выборки.

Результаты исследований показывают [22], что нейронная языковая модель Skip-gram превосходит другие модели по качеству получаемых векторных представлений. Поэтому в данной работе используется модель Skip-Gram.

4. Модель Skip-Gram. Модель Skip-Gram была предложена Томасом Миколовым с соавторами в 2013 году [23]. На вход модели подается неразмеченный корпус текстов, для каждого слова рассчитывается количество встречаемости этого слова в корпусе. Массив слов сортируется по частоте, редкие слова удаляются. Как правило, можно устанавливать порог встречаемости слова, при котором слово можно считать редким и до которого все редко встречающиеся слова будут удалены. Для того чтобы снизить вычислительную

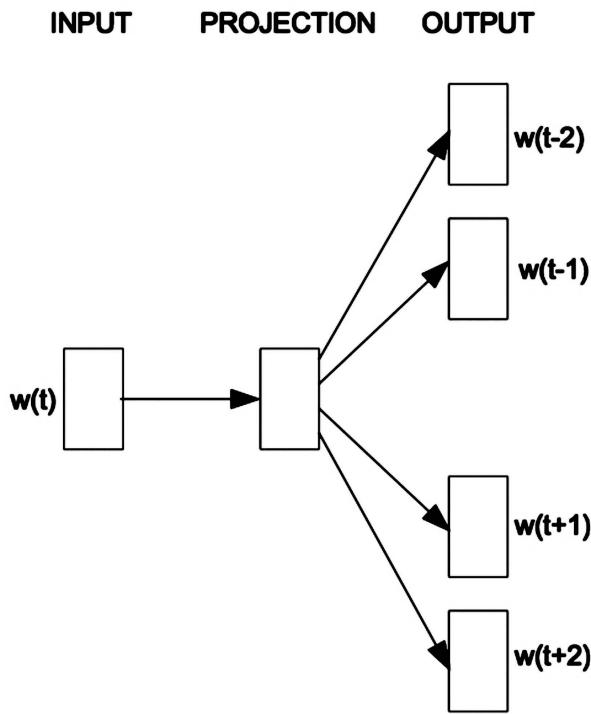


Рис. 1. Архитектура модели Skip-gram

сложность алгоритма, строится дерево Хаффмана (англ. Huffman Binary Tree). Далее алгоритм проходит заранее заданным размером окна по выбранному отрезку текста. Размер окна задается как параметр алгоритма. Под окном подразумевается максимальная дистанция между текущим и предсказываемым словом в предложении. То есть если окно равно трем, то для предложения „Я видел хороший фильм“ применение алгоритма Skip-грамм будет проходить внутри блока, состоящего из трех слов: „Я видел хороший“, „видел хороший фильм“. Далее применяется нейронная сеть прямого распространения (англ. Feedforward Neural Network) с многою переменной логистической функцией.

Схематически модель Skip-gramm представляется в виде нейронной сети (рис. 1):

Изображенная на рис. 1 нейронная сеть состоит из трех слоев: входной (англ. input), выходной (англ. output) и скрытый (англ. projection). Слово, подаваемое на вход, обозначено $w(t)$, в выходном слое слова $w(t-2)$, $w(t-1)$, $w(t+1)$ и $w(t+2)$ — слова контекста, которые пытаются предсказать нейронная сеть. Иными словами, модель skip-gramm предсказывает контекст при заданном слове.

4.1. *Формальная запись модели Skip-gram* представляется следующим: пусть задана текстовая коллекция, состоящая из слов w и их контекстов c . Задача модели состоит в том, чтобы подобрать вектор параметров θ модели таким образом, чтобы максимизировать условную вероятность всей коллекции $p(c|w)$ для всех возможных пар контекстов и слов (формула 2):

$$\arg \max_{\theta} \prod_{(w,c) \in D} p(c|w; \theta), \quad (2)$$

где D — множество всех возможных сочетаний слова и контекста.

Один из способов параметризации модели (формула 2) — это использование логистической функции (англ. Soft-max-function) для определения вероятности $p(w/c, \theta)$ (формула 3):

$$p(c|w; \theta) = \frac{e^{v_c \cdot v_w}}{\sum_{c' \in C} e^{v_{c'} \cdot v_w}}, \quad (3)$$

где v_c и $v_w \in \mathbb{R}^d$ — векторные распределенные представления контекста и слова. C — это множество всех контекстов. В числителе записана семантическая близость слов контекста (v_c) и выбранного целевого слова (v_w), в знаменателе — близость всех других контекстов коллекции ($v_{c'}$) и выбранного целевого слова (v_w).

Далее целевая функция логарифмируется (формула 2) и подставляется значение вероятностей (формула 3), в результате имеем:

$$\arg \max_{\theta} \sum_{(w,c) \in D} \log p(c|w) = \sum_{(w,c) \in D} (\log e^{v_c \cdot v_w} - \log \sum_{c'} e^{v_{c'} \cdot v_w}). \quad (4)$$

Целевая функция (формула 4) вычислима, однако она представляет собой вычислительно сложную задачу, так как для вычисления $p(w/c, \theta)$ требуется суммирование $\sum_{c' \in C} e^{v_{c'} \cdot v_w}$ по всем возможным контекстам термина, которых может быть огромное множество.

С целью оптимизации функции формулы 4 предлагается заменить обычную логистическую функцию (формула 3) на иерархическую софтмакс (англ. Hierarchical Softmax) или использовать негативное сэмплирование (англ. Negative Sampling).

Для каждого слова может существовать большое количество контекстов. Один из способов преодоления этой проблемы — это негативное сэмплирование. Его принцип заключается в том, что для выбранного термина считаются не все возможные контексты, но случайным образом выбирается несколько контекстов ($v_{c'}$). Например, если слово „фильм“ появляется в контексте развлечений, то вектор слова „развлечения“ будет ближе к вектору слова „фильм“, чем векторы некоторых других случайно выбранных слов (таких как ствол, творог или ранец), и не нужно проверять все слова из обучающей коллекции. Такой подход существенно облегчает построение модели.

5. Использование модели Skip-Gram для снижения зависимости от обучающей коллекции. Для обучения модели Skip-Gram произвольным образом было выбрано 5 миллионов текстов из первоначальной, не разделенной по классам тональности коллекции 2013 года. Коллекции 2014 и 2015 годов в обучении не участвовали, так как делается предположение, что обученная модель должна быть переносима на более поздние коллекции.

В качестве программной реализации модели Skip-gram был использован программный инструмент Word2Vec [24].

Одной из особенностей Word2Vec является то, что алгоритм разделяет термины между собой, если между ними стоит пробел. Для задачи классификации текстов по тональности важны частицы не и ни, поэтому, чтобы „не + слово“ не было разделено на два различных термина, пробел между частицами не и ни был заменен нижним подчеркиванием (напр. „ни_разу“, „не_хотел“).

Каждый текст из обучающей и тестовых коллекций был представлен в виде усредненного вектора входящих в него слов (формула 5):

Таблица 2

Результаты классификации текстов по тональности с использованием векторов слов, полученных при использовании распределенных представлений слов в качестве признаков

	Acc.	Precision	Recall	F-мера
2013	0,7206	0,7250	0,7221	0,7226
2014	0,7756	0,7763	0,7836	0,7787
2015	0,7289	0,7250	0,7317	0,7252

$$d = \frac{\sum \mathbf{w}_i}{n}, \quad (5)$$

где \mathbf{w}_i — векторное представление i -го слова, входящего в исследуемый текст, $i=(1,..,n)$. n — число слов из словаря, входящих в исследуемый текст.

Классификатор был обучен на коллекции 2013 года, далее обученная модель классификатора применялась для тестирования на коллекциях 2014 и 2015 годов. Результаты работы классификатора представлены в табл. 2. В качестве метрик оценки качества классификации выбраны стандартные метрики: правильности — accuracy, полноты — recall, точности — precision, гармонического среднего — F-мера.

Заключение. При использовании распределенного представления слов в качестве признаков для классификатора текстов по тональности качество классификации на три класса не только не снижается на коллекциях, собранных с разницей в полгода–год, но и держится на уровне лучших значений, зафиксированных в исследованиях [3]. Важно также отметить, что число координат в векторе признаков — ровно 300 (задаваемый параметр), а не несколько сотен тысяч, как в булевой модели для этой же тестовой коллекции.

Данный метод хорошо подходит для применения при наличии внешней достаточно представительной коллекции текстов, схожей по лексике с обучающей и тестовой коллекциями. Однако, как для других нейронных сетей, в этом случае требуется большая обучающая выборка текстов. Метод позволяет получить устойчивые и стабильные результаты.

Список литературы

1. Loukachevitch N. et al. SentiRuEval: testing object-oriented sentiment analysis systems in Russian // Proceedings of International Conference Dialog. 2015. P. 3–9.
2. Loukachevitch N., Rubtsova Y. Entity-Oriented Sentiment Analysis of Tweets: Results and Problems // Text, Speech, and Dialogue. Springer International Publishing, 2015. P. 551–559.
3. Chetviorkin I., Braslavskiy P., Loukachevitch N. Sentiment Analysis Track at ROMIP 2011 // Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Annual International Conf. „Dialogue“, CoLing&InTel. N 11 (18). 2012. P. 739–746.
4. Chetviorkin I., Loukachevich N. 2013. Sentiment analysis track at romip 2012 // In Proceedings of International Conference Dialog. V. 2. 2012. P. 40–50.
5. Amigó E. et al. Overview of RepLab 2012: Evaluating Online Reputation Management Systems // CLEF (Online Working Notes/Labs/Workshop). 2012.
6. Amigó E. et al. Overview of replab 2013: Evaluating online reputation monitoring systems // International Conference of the Cross-Language Evaluation Forum for European Languages. Springer Berlin Heidelberg. 2013. P. 333–352.

7. Loukachevitch, N., Rubtsova, Y. SentiRuEval-2016: Overcoming Time Gap and Data Sparsity in Tweet Sentiment Analysis // In Proceedings of International Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialog-2016. 2016. P. 375–384.
8. Rosenthal, S., Farra, N., & Nakov, P. SemEval-2017 task 4: Sentiment analysis in Twitter // In Proceedings of the 11th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2017). 2017. P. 502–518.
9. Pang B., Lee L., Vaithyanathan S. Thumbs up?: sentiment classification using machine learning techniques // Proceedings of the ACL-02 conference on Empirical methods in natural language processing. V. 10. Association for Computational Linguistics, 2002. P. 79–86.
10. Turney P. D. Thumbs up or thumbs down?: semantic orientation applied to unsupervised classification of reviews // Proceedings of the 40th annual meeting on association for computational linguistics. Association for Computational Linguistics, 2002. P. 417–424.
11. Wilson T., Wiebe J., Hoffmann P. Recognizing contextual polarity in phrase-level sentiment analysis // Proceedings of the conference on human language technology and empirical methods in natural language processing. Association for Computational Linguistics, 2005. P. 347–354.
12. Jiang L. et al. Target-dependent twitter sentiment classification // Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. V. 1. Association for Computational Linguistics, 2011. P. 151–160.
13. Лукашевич Н., Рубцова Ю. Объектно-ориентированный анализ твитов по тональности: результаты и проблемы // Труды Международной конференции DAMDID/RCDL-2015. Обнинск, 2015. С. 499–507.
14. Клековкина М. В., Котельников Е. В. Метод автоматической классификации текстов по тональности, основанный на словаре эмоциональной лексики // Труды конференции RCDL. 2012. С. 118–123.
15. Read J. Using emoticons to reduce dependency in machine learning techniques for sentiment classification // In Proceedings of ACL-05, 43nd Meeting of the Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics, 2005.
16. Рубцова Ю. В. Метод построения и анализа корпуса коротких текстов для задачи классификации отзывов // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Труды XV Всероссийской научной конференции RCDL'2013, Ярославль, Россия, 14–17 октября 2013 г. Ярославль: ЯрГУ, 2013. С. 269–275.
17. Рубцова Ю. В. Разработка и исследование предметно независимого классификатора текстов по тональности // Труды СПИИРАН. 2014. Т. 5. № 36. С. 59–77.
18. Рубцова Ю. Автоматическое построение и анализ корпуса коротких текстов (постов микроблогов) для задачи разработки и тренировки тонового классификатора // Инженерия знаний и технологии семантического веба. 2012. Т. 1. С. 109–116.
19. Rubtsova Y. Reducing the Degradation of Sentiment Analysis for Text Collections Spread over a Period of Time // International Conference on Knowledge Engineering and the Semantic Web. Springer, Cham, 2017. P. 3–13.
20. Рубцова Ю. В. Преодоление деградации результатов классификации текстов по тональности в коллекциях, разнесенных во времени // Системная информатика. 2016. С. 45–68.
21. Titov, I. Modeling Online Reviews with Multi-grain Topic Models // Proceedings of the 17th International Conference on World Wide Web (WWW'08). 2008. P. 111–120.
22. Levy, O. Improving Distributional Similarity with Lessons Learned from Word Embeddings // Transactions of the Association for Computational Linguistics. 2015. P. 211–225.
23. Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv preprint arXiv: 1301.3781. 2013.
24. Mikolov T., Sutskever I., Chen K., Corrado G., and Dean J. Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionalities // In Proceedings of NIPS, 2013. P. 3111–3119.



Юлия Рубцова. E-mail:
yu.rubtsova@gmail.com.

Юлия Рубцова закончила механико-математический факультет НГУ в 2007 году. С 2017 года работает младшим научным сотрудником в лаборатории искусственного интеллекта в Институте систем информатики имени А. П. Ершова. Темой классификации текстов занимается с 2012 года. В 2015–2016 годах Ю. Рубцова была соорганизатором международных соревнований по автоматической классификации текстов по тональности в рамках международной конференции „Диалог“. Ю. Рубцова состоит в программном комитете международной конференции „Knowledge engineering and semantic web“.

Yuliya Rubtsova. E-mail: yu.rubtsova@gmail.com.

Yuliya Rubtsova received her bachelor degree in Mathematics from the Mechanics and Mathematics Department of the Novosibirsk State University in 2007. Since 2017 she has been working as a junior researcher in the Laboratory of Artificial Intelligence in the Institute of system Informatics named after A. P. Ershov. The area of researchers interests is text analysis, she engaged this field since 2012. In 2015–2016 Yu. Rubtsova was a co-organizer of international competitions on the automatic sentiment classification the international conference „Dialogue“. Yu. Rubtsova is a program committee member of the international conference „Knowledge engineering and semantic web“.

Дата поступления — 05.02.2018

RADAR REMOTE SENSING METHODS OF FOREST COVER

M. G. Razakova

JSC „National center of space researches and technologies“
050010, Almaty, Kazakhstan

By way of analysis of a group of the radar-imagery statistical information, we determine an optimal level of filtration for automatic allocation of main objects of the observed surface. This analysis has been made based on the satellite data TerraSAR-X in both parallel and cross-polarization modes (VV, VH). Some pre-radiometric calibration values for the magnitudes are required since the radar imagery is performed under an angle. For this, we need to extract the value of sigma naught (radiometric calibration). To eliminate the high-frequency noise could be used many different filters; a simplest one is the average filter. To determine the degree of averaging, it is possible to calculate the analytical form of relationship between the size of the signature smoothing and residual values of magnitudes of radar data. The radar ability to detect texture is a major advantage over other types of imagery where the texture is not a quantitative characteristic. Filtration methods can distinguish an object component of the signal.

There are three main groups of image processing algorithms on computers: (a) initial (pre-) image processing algorithms for restoration, cleaning from random noise, improve the quality, correction of geometric distortion of radar systems; (b) thematic image processing and pattern recognition algorithms; they are performed to determine the parameters of image detail and include: finding the homogeneity of the image in terms of light and color areas, extract the feature forms, identify the coordinates of the singular points of objects and so on; (c) algorithms of the target isolation of specific objects by binarization methods of the image; in accordance with the predetermined threshold, the values of separate elements will be identified, which are suitable under the conditions of the task we discuss.

In the work, we show that by regular applying filtration methods to radar data, the area covered by vegetation has the maximum difference in the cross polarization image in comparison with that of classified forest area.

Key words: radar satellite data, forest classification.

References

1. Luong Viet Nguyen, Ryutaro Tateishi, Akihiko Kondoh, Ram C. Sharma, Hoan Thanh Nguyen, Tu Trong To and Dinh Ho Tong Minh. Mapping Tropical Forest Biomass by Combining ALOS-2, Landsat 8, and Field Plots Data. // Land 2016, 5, 31; doi:10.3390/land5040031. [Electron. Res.]: <http://www.mdpi.com/journal/land>
2. Rodionova N. V. Sezonnye variatsii obratnogo rasseyaniya ot estestvennykh pokrovov Podmoskov'ya v sezon 2015–2016 godov po radarnym dannym SENTINEL 1A // 14-ya Vserossijskaya otkrytaya konferentsiya „Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa“: tez. dokl. 2016. S. 367. [Electron. Res.]: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5482
3. Chimitdorzhiev T. N. Polyarimetriceskaya oczenka prostranstvennyh fluktuacij radarnyh izobrazhij dlya vosstanovleniya struktury lesnogo pologa // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2007. N 5. S. 80–82.
4. Small D., Zuberbühler L., Schubert A., Meier E. Terrain-flattened gamma naught Radarsat-2 backscatter // Canadian Journal of Remote Sensing, Oct. 2011. Vol. 37 (5). P. 493–499.



РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

М. Г. Разакова

АО „Национальный центр космических исследований и технологий“,
050010, г. Алма-Ата, Казахстан

УДК 550.388.2

На основе анализа набора статистической информации по данным радиолокационной съемки определен оптимальный уровень фильтрации для автоматического выделения основных объектов наблюдаемой поверхности. Анализ производился по данным с космического аппарата TerraSAR-X в согласованной и кросс-поляризациях (VV, VH). Показано, что территория, покрытая растительностью, имеет максимальные различия в кросс-поляризационных изображениях, выделены контуры лесного массива.

Ключевые слова: радиолокационные спутниковые данные, лесной массив, классификация.

Микроволновая съемка перспективна для картирования и мониторинга лесных территорий, обнаружения зон природных и антропогенных воздействий на лесной покров, а также при определении биомассы и сомкнутости древостоев. Спутниковые данные оптического датчика широко использовались для оценки структурных характеристик леса. Однако применение оптических данных для оценки лесной биомассы сложно частыми присутствующими облачными покровами. Радиолокационные импульсы в виде длинноволновых микроволн способны работать днем и ночью, в любых атмосферных условиях, могут проникать через структуру деревьев. Тем не менее, обратное рассеяние радаров, полученное из лесов, является сложным из-за того, что различные типы рассеивания, которые удваиваются, вызывают рассеяние от поверхности, рассеяние от структуры ствола дерева, рассеяние от купола и т. д. Предыдущие исследования показали, что на рассеяние влияют различные факторы, такие как рельеф, температура, диэлектрическая постоянная и содержание влаги, а также характеристики структуры, покрытия и видов растительности [1]. В данной работе радиолокационные данные предварительно нормализуются относительно влияния рельефа. Территорией исследования является лесной массив вблизи города Семей. Радиолокационная съемка чувствительна к диэлектрическим, структурным и текстурным свойствам исследуемого объекта. На основе данных радиолокационной съемки TerraSAR-X были исследованы следующие характеристики наблюдаемой поверхности:

- отражающие свойства поверхности (удельная эффективная площадь рассеяния) в диапазонах волн РСА с учетом поляризаций на излучение и прием;
- информация, характеризующая изменение фазы сигнала при отражении;
- пространственно-статистические характеристики (гистограммы распределения, корреляционные функции).

Таблица 1

Пространственное разрешение спутниковых радиолокационных изображений

Космический аппарат	Спектральный диапазон	Пространственное разрешение
ALOS PALSAR	L	10 м
Sentinel1A	C	5 м
TerraSAR-X	X	1 м

Исследования территорий лесных массивов по данным радиолокационной съемки проводились в основном с использованием С и L длин волн [2, 3]. Применение же радиолокационного зондирования X-диапазона для растительного покрова имеет свои недостатки, особенно в случае использования такого параметра как когерентность. Это связано с зашумленностью радиолокационных данных X-диапазона, полученных при съемке земных поверхностей с растительностью.

Активное зондирование при длине волны около 3 см, отражательная способность листвы деревьев, луговых растений, а также времененная изменчивость их в вегетативный сезон являются причиной зашумленности полученных данных. Однако преимущественных свойств данных с космического аппарата в этом диапазоне (TerraSAR-X) больше, это:

- высокое пространственное разрешение (1 м), сравнимое с оптическими данными;
- возможность вычисления миллиметровых смещений земной поверхности;
- хорошая геопривязка снимков (в данном случае с точностью до 1 м);
- возможность построения высокодетальных цифровых моделей рельефа.

В данной работе предлагается метод выделения лесных массивов по данным радиолокационного спутникового изображения TerraSAR-X на основе комплексирования двух параметров: исключения влияния рельефа и меры шумоподавления.

Данные TerraSAR-X были получены за июль 2014 г. в двух поляризациях (VV, VH). Предварительно была произведена радиометрическая калибровка значений амплитуд и вычислены значения σ^0 . Величину отраженного радарного сигнала характеризуют коэффициентом обратного рассеяния σ^0 (sigma-naught). Величину σ^0 можно определить как количественную оценку, характеризующую способность объекта рассеивать падающее на него микроволновое излучение [4]. В различных публикациях можно встретить другие определения σ^0 . Понятия „эффективная площадь отражения“ (ЭПО, radar cross-section) и „яркость радарного изображения“ (radar brightness) являются практически одинаковыми. Таким образом, устранены помехи, обусловленные влиянием рельефа местности и погрешности измерений. Точность оценки этих характеристик во многом зависит от возможностей усреднения данных по площади.

Предположительно, основная масса шума радиолокационных данных может быть объяснена отражательными свойствами X-диапазона длин волн от растительного покрова. Для устранения высокочастотного шума применяются различные фильтры, из которых самый простой — фильтр усреднения. Сглаживающий фильтр основывается на следующем принципе: находится среднее арифметическое значение всех элементов рабочего окна изображения (отдельно по каждому из каналов), после чего это среднее значение становится значением среднего элемента. Одним из применений фильтров является шумоподавление. Шум меняется независимо от пикселя к пикселю, и, при условии, что математическое ожидание значения шума равно нулю, шумы соседних пикселей при суммировании будут компенсировать друг друга. Чем больше окно фильтрации, тем меньше будет усреднен-

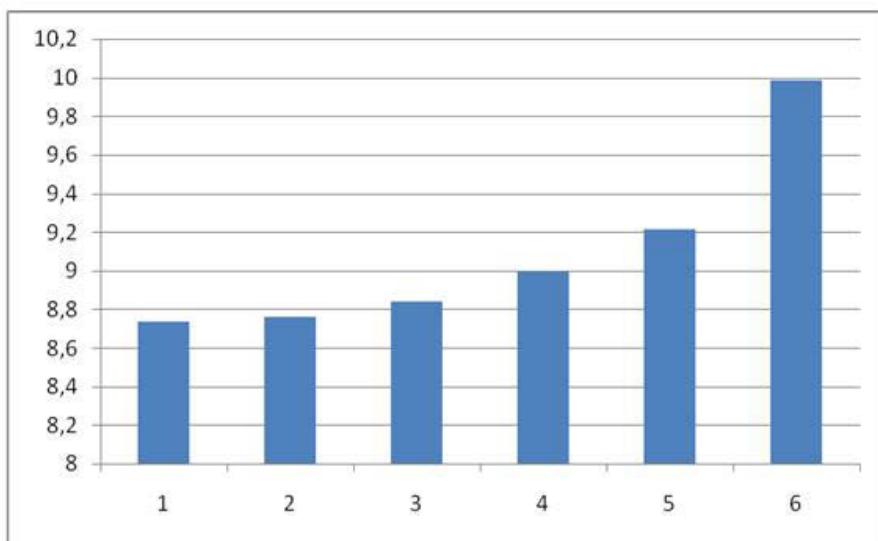


Рис. 1. Гистограмма стандартных отклонений значений амплитуд радиолокационных данных TerraSAR-X

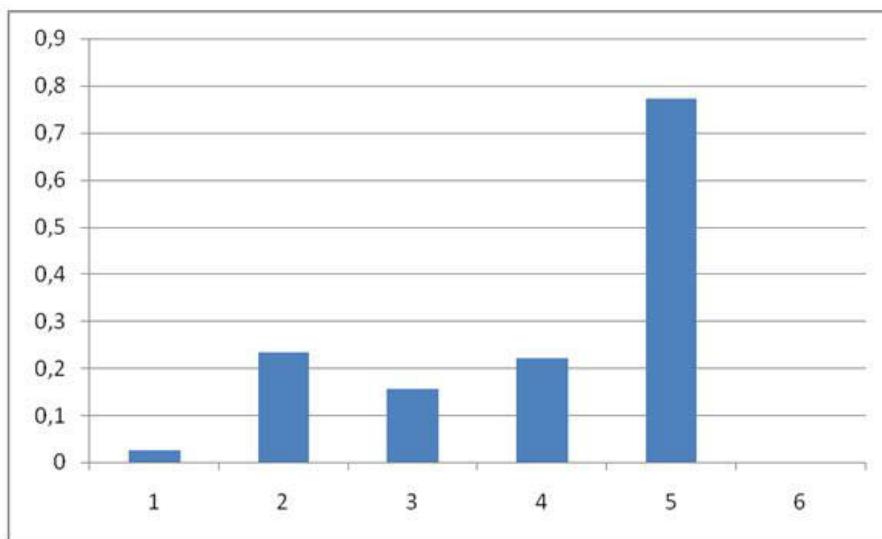


Рис. 2. Гистограмма разности стандартных отклонений значений амплитуд радиолокационных данных TerraSAR-X

ная интенсивность шума, однако при этом будет происходить и соответствующее размытие значащих деталей изображения. Существуют три основные группы алгоритмов обработки изображений на компьютерах:

1. Первичная (предварительная) обработка изображений с целью реставрации, очистки от случайных шумов, улучшения качества, коррекции геометрических искажений оптических систем.

2. Тематическая обработка изображений, распознавание образов. Выполняется для определения параметров деталей изображения и включает нахождение однородных по уровню освещенности и цвету областей изображения, выделение признаков формы изображений, определение координат особых точек объектов и пр.

Таблица 2
Статистическая информация

№	Min	Max	Median	Mode	Mean	Размер сигнатуры	Разность знач. сигн	SD	Разность SD
1	1	89	29	31	29,291	225	24	8,734	0,025
2	1	96	29	31	29,425	201	44	8,759	0,234
3	1	112	29	31	29,674	157	46	8,838	0,155
4	1	139	29	31	29,939	111	36	8,993	0,221
5	1	187	29	31	30,149	75	50	9,214	0,771
6	1	354	29	24	30,453	25		9,985	

3. Выделение определенных целевых объектов методами бинаризации изображения. По заданным пороговым значениям вычленяются отдельные элементы, соответствующие условиям поставленных задач.

Способность радара обнаруживать текстуру является основным преимуществом над другими видами съемки, где текстура не является количественной характеристикой. Методами фильтрации можно выделить объектную составляющую сигнала. Объектная составляющая отраженного сигнала позволит нам выделить основные классы объектов, размеры которых соизмеримы или превышают размеры площади объектов исследования. Видовая составляющая обусловлена источниками, размеры которых невелики. Эта составляющая представляет наибольший интерес, т. к. несет информацию о неоднородностях или принадлежности разным классам объектов, размеры которых значительно меньше размеров площади исследования.

Для определения степени усреднения был вычислен аналитический вид зависимости размера сигнатуры сглаживания и остаточной величины значений амплитуд радиолокационных данных. Параметром оценки остаточной величины значений амплитуд радиолокационных данных рассматривалось стандартное отклонение амплитуд результата сглаживания. На каждом этапе фильтрации радиолокационного изображения автоматически вычислялся массив статистической информации (табл. 2).

Статистическая информация:

Min: минимальное (низкое) значение файла.

Max: максимальное (высокое) значение файла.

Mean: среднее (среднее) значение файла.

Median: медиана значений файлов (точка, в которой есть как много пикселей больших значений, так и меньших).

Mode: показывает (наиболее часто встречающиеся) среди значений файлов.

SD: стандартное отклонение.

Эта группа базируется на статистических данных, которые вычисляются по цифровой матрице значений радиолокационного изображения. Статистика была генерирована при фильтрации радиолокационных данных для размеров сигнатуры: 25, 75, 111, 157, 201, 225 (табл. 2).

Определены параметры уравнения регрессии и вычислены значения объектной составляющей значений амплитуд радиолокационных данных, оценена статистическая значимость уравнения.

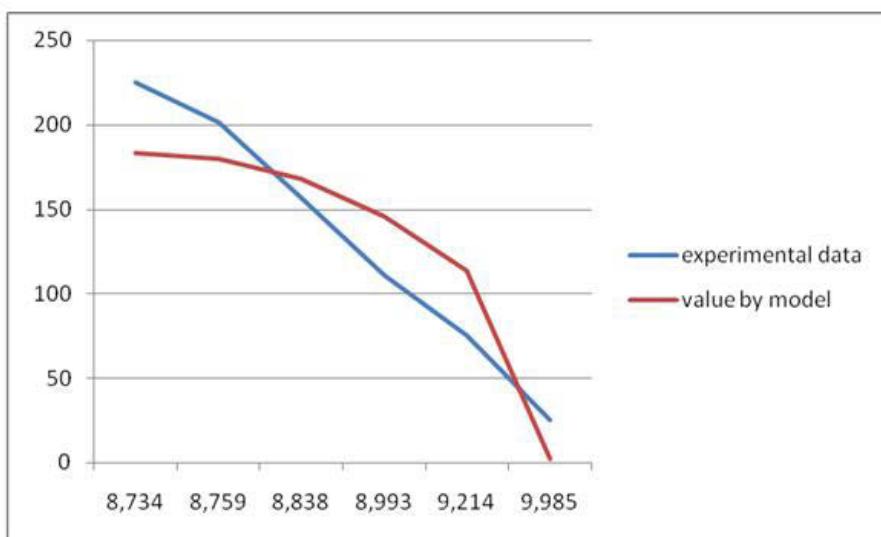


Рис. 3. График зависимости стандартных отклонений значений амплитуд и размеров сигнатуры усреднения радиолокационных данных TerraSAR-X

Таблица 3
Регрессионная статистика

Множественный R	0,9
R-квадрат	0,8
Нормированный R-квадрат	0,8
Стандартная ошибка	37,3
Наблюдения	6

Таблица 4
Коэффициенты

Y-пересечение	1448,6
Переменная X 1	-144,8

Коэффициент детерминации — $R^2 = 0,8$ показывает, что на 81 % расчетные параметры модели, то есть сама модель, объясняют зависимость и изменения изучаемого параметра — **размера сигнатуры (Y)** от исследуемых фактора — **стандартного отклонения (X)**.

-144,85- a_1 — коэффициент, который показывает весомость влияния фактора X_1 на Y . Уравнение регрессии выглядит следующим образом:

$$Y = 1448,6 - 144,85x$$

Подстановкой в правую часть уравнения значения i получены теоретические значения аппроксимирующей функции Y_i (рис. 3).

С увеличением размера сигнатуры усреднения значений амплитуд радиолокационных данных уменьшается соответственно величина стандартного отклонения амплитуды. Цифровая фильтрация реализуется методом скользящего окна. Процедура усреднения значений амплитуд радиолокационных данных завершается при достижении минимального зна-

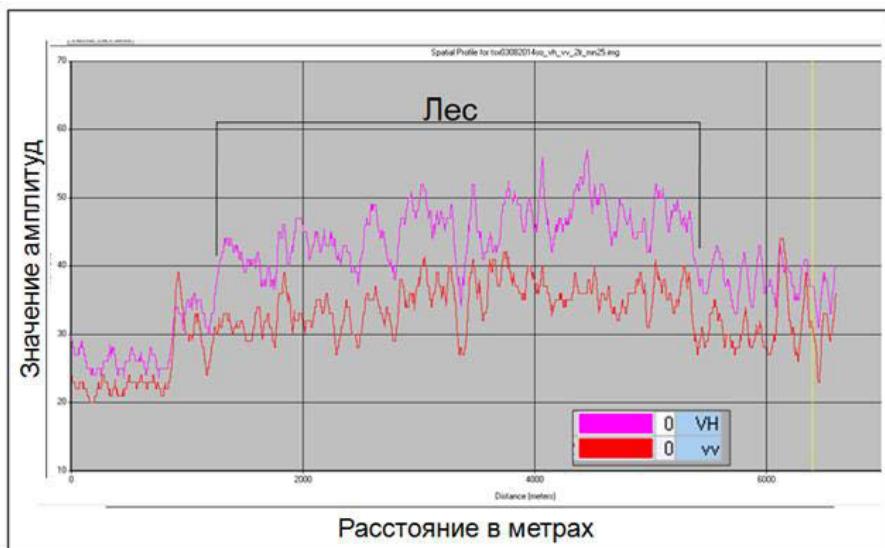


Рис. 4. Значения амплитуд данных TerraSAR-X (vh; vv), по линии профиля пересекающих лесную полосу

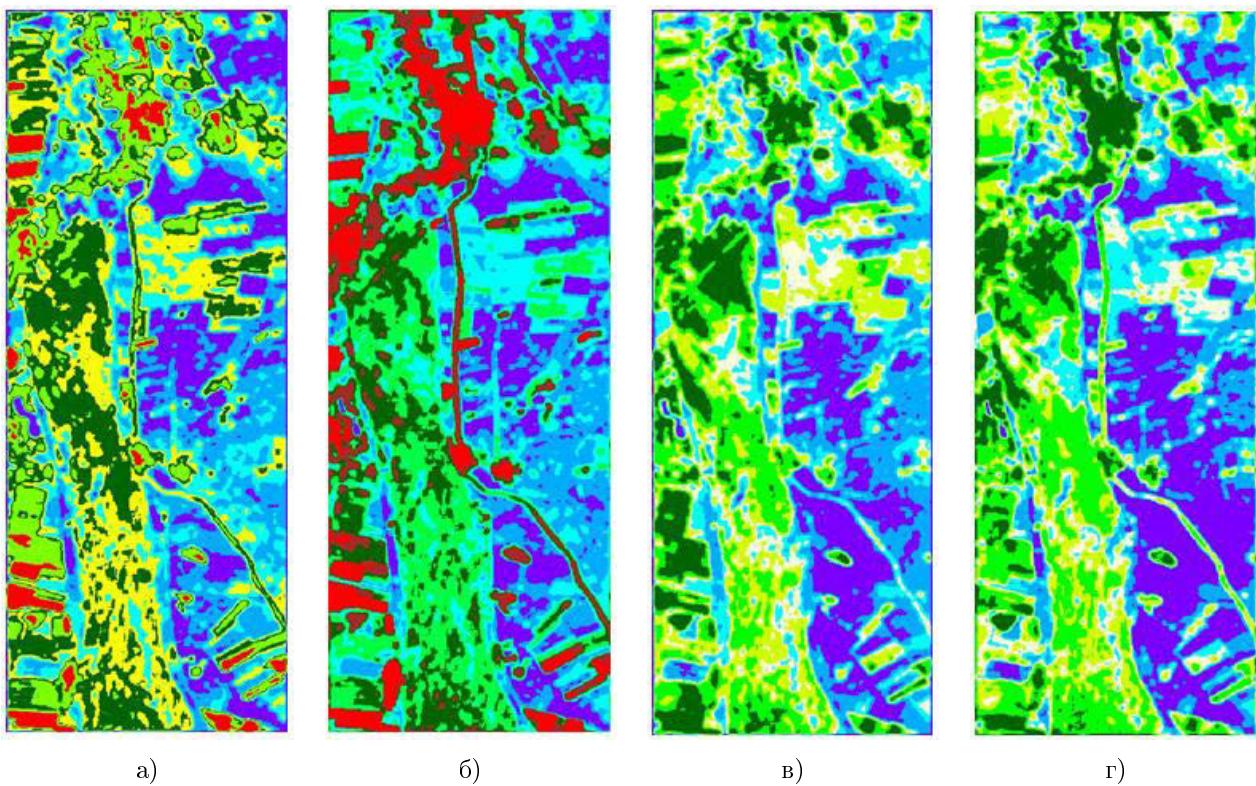


Рис. 5. Классификация результата фильтрации радиолокационного изображения поляризации VH и VV.
а, в) методом среднего; б, г) методом стандартного отклонения

чения стандартного отклонения амплитуды. Для этого сравниваются разности стандартных отклонений амплитуд на каждом шаге сглаживания. В нашем случае наблюдается скачок значений от 0,234 до 0,025 (табл. 2, гистограмма 2), что соответствует размеру сигнатуры усреднения 201 (гистограмма 2, 1-й столбик). Данный результат усреднения зна-

чений амплитуд радиолокационных данных принимаем как оптимальный и будем отождествлять с объектной составляющей значений амплитуд. Действительно, лесные участки имеют более выраженную текстуру, чем луга (рис. 4). Свойства ландшафтных объектов характеризуют вычисляемые текстурные признаки.

Произведена классификация без обучения методом К-средних по данным, полученным в результате вычислений объектных составляющих в поляризациях VH и VV радиолокационных данных.

При рассмотрении классификации, приведенной на рис. 5 хорошо выделяются контуры лесного массива, дешифрируются поля, строения: синий цвет — соответствует классу „поле“, затем два оттенка зеленого — области, покрытые богатой растительностью, красный соответствует классам строений. На лес приходится два класса: светло- и темно-зеленый цвета. Классификация при поляризации VV данных не дает четкого разграничения классов „лес“ и „строения“, как при поляризации VH. Совместное использование таких характеристик как поляризация и методы фильтрации позволяют сделать систему признаков, чувствительную как к размерам, так и к ориентации элементов, образующих текстуру. Синтезированное изображение из различных поляризаций и отфильтрованных данных дает более четкую классификацию растительности.

Список литературы

1. Luong Viet Nguyen, Ryutaro Tateishi, Akihiko Kondoh, Ram C. Sharma, Hoan Thanh Nguyen, Tu Trong To and Dinh Ho Tong Minh . Mapping Tropical Forest Biomass by Combining ALOS-2, Landsat 8, and Field Plots Data.// Land 2016, 5, 31; doi:10.3390/land5040031, [Electron. Res.]: <http://www.mdpi.com/journal/land>
2. Родионова Н. В. Сезонные вариации обратного рассеяния от естественных покровов Подмосковья в сезон 2015–2016 годов по радарным данным SENTINEL 1A // 14-я Всероссийская открытая конференция „Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса“: тез. докл. 2016. С. 367. [Электрон. рес.]: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5482
3. Чимитдоржиев Т. Н. Поляриметрическая оценка пространственных флюктуаций радарных изображений для восстановления структуры лесного полога // Исследование Земли из космоса. 2007. № 5. С. 80–82.
4. Small D., Zuberbühler L., Schubert A., Meier E. Terrain-flattened gamma nought Radarsat-2 backscatter // Canadian Journal of Remote Sensing, Oct. 2011. Vol. 37 (5). P. 493–499.



Разакова Майра Габбасовна — зав. лабораторией геоинформатики, геомоделирования и ГИС-технологий, АО „Национальный центр космических исследований и технологий; e-mail: mairarazakova@gmail.com.

Разакова М. Г., специальность „Математика“, является ведущим специалистом в области применения геоинформационных технологий и геоинформационного моделирования для тематической обработки и интерпретации дан-

ных дистанционного зондирования, подтвержденные сертификатами:

- Работа в программном комплексе Geomatica 10, ООО „Гео-Альянс“, 27.06.2011 — 02.07.2011;
- Интерферометрическая обработка данных ДЗЗ в программном обеспечении Gamma Software, ООО „Гео-Альянс“, 22.08.2011 — 03.09.2011;
- CASI Normalization and Data Fusion Itres — Гиперспектральные системы и решения, 2007;

— CASI Hyperspectral Analysis and GIS Integration (CASI гиперспектральный анализ и интеграция ГИС), Itres — Гиперспектральные системы и решения, 2007;

— „Definiens Professional 5.0 Basic and Advanced Training“, organized by Definiens — The Image Intelligence Company, June 26–30, 2006;

— Radar Mapping Suite, The Earth to Business Company erdas, 25 июня — 5 июля 2012.

Сфера занятости: определение смещений земной поверхности в результате антропогенной деятельности методами радиолокационной интерферометрии, обработка данных дистанционного зондирования (ДЗ) по обнаружению нефтяных загрязнений водной поверхности, почвенного покрова, дешифрирование тепловых аномалий, построение цифровых моделей рельефа, тематическая классификация объектов земной поверхности (ЗП), определение временных изменений ЗП по серии снимков радиолокационных и оптических данных, вычисление объемов объектов земной поверхности по ДЗ, выявление изменений лесного покрова и т.д. По результатам работ опубликовано более 30 публикаций, получены грамоты и благодарности на международных конференциях и семинарах. Стаж работы более 30 лет:

2011 г. — настоящее время АО „Национальный центр космических исследований и технологий“, должность: заведующая лаборатории геоинформатики и ГИС-технологий. 2003–2011 гг. АО „КазГеоКосмос“, департамент геологии и геофизики, должность: главный менеджер. 1991–2003 гг. Институт космических исследований (НИИ) Министерства образования и науки Республики Казахстан, должность: старший научный сотрудник лаборатории ГИС. 1984–1991 гг. Институт Сейсмологии Академии наук Республики Казахстан, должность: инженер.

Maira G. Razakova, specialty „Mathematics“ (Kazakh State University (1979–1984)), is a leading specialist in the application of GIS and geoinformation modeling for thematic processing and interpretation of remote sensing data. Had got certified:

CASI Normalization and Data Fusion Itres — Hyperspectral systems and solutions, 2007 CASI Hyperspectral Analysis and GIS Integration (CASI hyperspectral analysis and GIS integration), Itres — Hyperspectral systems and solutions, 2007 „Definiteness Professional 5.0 Basic and Advanced Training“, organized by Definiteness — The Image Intelligence Company, June 26–30, 2006.

Work in the Geomatics 10 software package, Geo-Alliance LLC, 27/06/2011 — 02/07/2011 Interferometric processing of remote sensing data in software Gamma Software, Geo-Alliance LLC, 22/08/2011 — 03/09/2011 Radar Mapping Suite, The Earth to Business Company, June 25 — July 5, 2012.

Scope of employment: determination of earth surface displacements using methods of radar interferometry, processing remote sensing data to detect contamination of soil, water surface, the identification of solid domestic waste, control of the state of infrastructure, determination of temporal changes on the Earth's surface using a series of images of radar and optical data, calculation of the volumes of objects of the Earth's surface by the remote sensing data, identifying the changes in forest cover and etc. By results of works were published more than 30 articles, have been got diplomas and gratitude at international conferences and seminars. Experience over 30 years:

2011 — to the present. JSC „National Centre of Space Research and Technology“, position: Head of the Laboratory of Geoinformatics and GIS technologies.

2003–2011. JSC „KazGeoCosmos“, geology and geophysics department, position: general manager.

1991–2003. Space Research Institute (SRI) of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, position: senior scientist in GIS laboratory.

1984–1991. Seismic Institute of the Academy of Sciences Republic of Kazakhstan, position: engineer.

SPECTRAL ANALYSIS OF THE JOURNAL CITATION NETWORK

S. V. Bredikhin, V. M. Lyapunov, N. G. Shcherbakova

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

In this paper we investigate methods of spectral clustering for analysis of the journal citation networks. Clustering problem is reduced to min-cut graph partitioning: to find a partition of the graph such that the edges between different groups have very low weights and the edges within a group have high weights. That means that objects in different clusters are dissimilar from each other and objects within the same cluster are similar to each other, see C. J. Alpert, S.-Z. Yao (1995). Graph partitioning problems can be solved exactly in polynomial time, so for practical applications approximate solution methods have been developed. One of the widely used is the spectral partitioning method. The spectral methods usually involve taking the eigenvectors of some matrix based on relations between data elements. Most spectral clustering algorithms cluster the data with the help of eigenvectors of graph Laplacian matrices.

We study two major versions of spectral clustering, so called “unnormalized” and “normalized” spectral clustering that reveal the relationship of the object function formulation and the matrix used in the eigenvalue equation. Unnormalized spectral bi-clustering algorithms use the Laplacian matrix $L = D - A$ for solving the problem $L\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}$ and assigning vertices to clusters according to the signs of elements of the eigenvector \mathbf{v} corresponding to the second smallest eigenvalue. The simplified versions of the unnormalized spectral bi-clustering method is presented as the techniques of the consistency confirmation of the approach. As shown in M. E. J. Newman, M. Girvan (2004) this class of spectral clustering is only consistent under strong additional assumptions, which are not always satisfied in real data. Most of normalized spectral bi-clustering algorithms use the symmetric normalized Laplacian matrix $L^{sym} = D^{-1/2}LD^{-1/2}$ for these purposes, see J. Shi, J. Malik (2000). As shown in M. Meila, J. Shi (2001) the same results can be obtained by using the largest eigenvector of the matrix $P = D^{-1}A$. Spectral k -way clustering uses not only the second but also the next few eigenvectors to construct a partition.

The journal citation network on study is built on the basis of the bibliographic information extracted from the DB *RePEc*. The main component of the corresponding weighted digraph G has 1729 vertices (journals) and 135702 arcs (citations). We analyze the work of two spectral clustering algorithms in the context of three versions of transformation of digraph G to an undirected form. So, we examine the graphs represented by matrices $A + A^\top$ (graph G^U), AA^\top (graph G^{bib}) and $A^\top A$ (graph G^{coc}), where A is the journal-journal citation matrix. Algorithm *WTR* P. Pons, M. Latapy (2005) is the agglomerative algorithm based on random walk matrix $P = D^{-1}A$. Algorithm *LEV* M. E. J. Newman (2006) is the bi-clustering algorithm based on the modularity matrix. The algorithms are implemented with use of the *igraph* packet (*C* library). We use *NMI*, *RAND*, *ADJUSTED_RAND* indexes as the measures of similarity of two data clusterings. For G^U clustering the similarity is low, as an example *ADJUSTED_RAND* = 0,07. The most similarity is reached for graph G^{bib} . *WTR* clusters of small size (less than 200) can be interpreted in terms of thematic fields. The results are presented in the tables (1–6). We can see that results strongly depend on the digraph transformation and the algorithm used.

Key words: journal citation network, co-citation network, bibliographic coupling network, weighted directed graph, graph partitioning, spectral clustering.

References

1. BRANDES U., GAERTLER M., WAGNER D. Experiments on graph clustering algorithms // Proc. of the 11th Annual European Symposium on Algorithms (ESA'03). 2003. P. 568–579.
2. ALPERT C. J., YAO S.-Z. Spectral partitioning: The more eigenvectors, the better // Proc. of the 32nd annual ACM/IEEE Design Automation Conference. 1995. P. 195–200.
3. GAREY R. R., JOHNSON D. S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. 1990. NY: W. H. Freeman & Co.
4. GOULD P. The Geographical Interpretation of Eigenvalues // Institute of British Geographers Transactions. 1967. V. 42. P. 53–85.
5. DONATH W. E., HOFFMAN A. Algorithms for partitioning of graphs and computer logic based on eigenvectors of connection matrices // IBM Technical Disclosure Bulletin. 1972. V. 15, iss. 3. P. 938–944.
6. BARNES E. An Algorithm for Partitioning the Nodes of a Graph // SIAM J. Alg. Disc. Math. 1982. V. 3, iss. 4. P. 541–550.
7. SARKAR S., BOYER K. L. Quantitative measures of change based on feature organization: Eigenvalues and eigenvectors // Computer Vision and Image Understanding. 1998. V. 71, N 1. P. 110–136.
8. HALL K. M. An r -dimensional Quadratic Placement Algorithm // Management Science. 1970. V. 17. P. 219–229.
9. MOHAR B. The Laplacian Spectrum of Graphs. Graph Theory & Application. Wiley, 1991. P. 871–898.
10. NEWMAN M. E. J. Finding community structure using the eigenvectors of matrices // Phys. Rev. E 74, 036104 (2006).
11. WEST D. B. Introduction to Graph Theory. Prentice Hall, 1996.
12. DONETTI L., MUÑOZ A. Detecting network communities: a new systematic and efficient algorithm // J. of Statistical Mechanics. 2004. P. 10012.
13. BARNARD S., POTHEIN A., SIMON H. A spectral algorithm for envelope reduction of sparse matrices // Numer. Linear Algebra Appl. 1995. V. 2. P. 317–334.
14. GUATTERY S., MILLER G. On the quality of spectral separators // SIAM J. Matrix Anal. Appl. 1998. V. 19. P. 701–719.
15. WEI Y.-C., CHENG C.-K. Toward efficient hierarchical designs by ratio cut partitioning // Proc. of the IEEE International Conference on Computer Aided Design. 1989. P. 298–301.
16. SHI J., MALIK J. Normalized cut and image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. V. 22, iss. 8. P. 888–905.
17. MEILA M., SHI J. A random walks view of spectral segmentation // Proc. International Workshop on AI and Statistics (AISTAT) 2001. [Electron. resource]. <https://dblp1.uni-trier.de/db/conf/aistats/aistats2001.html>.
18. ROSVALL M., BERGSTROM C. T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105, N 4. P. 1118–1123.
19. PONS P., LATAPY M. Computing communities in large networks using random walks // J. of Graph Algorithms and Applications. 2006. V. 10, N 2. P. 191–218.
20. WARD J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // J. of the American Statistical Association. 1963. V. 58, N 301. P. 236–244.
21. NEWMAN M. E. J., GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks // Phys. Rev. 2004. E 69 (2) 026113.

22. RAGHAVAN U. N., ALBERT R., KUMARA S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks // Phys. Rev. E 76, 036106.
23. BRANDES U., DELLING D., GAERTLER M., GORKE R., HOEFER M., NIKOLOSKI Z., WAGNER D. On Modularity Clustering // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2008. V. 20, iss. 2. P. 172–188.
24. BLONDEL V., GUILLAUME J., LAMBIOTTE J., LEFEBVRE E. Fast unfolding of communities in large networks // J. Stat. Mech. 2008, P10008.
25. CHUNG F., LU L. Connected components in random graphs with given degree sequences // Annals of Combinatorics. 2002. V. 6. P. 125–145.
26. LUCZAK T. Sparse random graphs with a given degree sequence // Proc. of the Symposium on Random Graphs. Poznac, 1989. NY: John Wiley, 1992. P. 165–182.
27. MOLLOY M., REED B. A critical point for random graphs with a given degree sequence // Random Structures and Algorithms. 1995. V. 6. P. 161–179.
28. REPEC. General principles. [Electron. resource]. <http://repec.org/>.
29. BREDIKHIN S. V., LYAPUNOV V. M., SCHERBAKOVA N. G. Cluster Analysis of the Citation Network of Scientific Journals // Problemy informatiki. 2017. N 3. P. 38–52.
30. IGRAPH – The network analysis package. [Electron. resource]. <http://igraph.org/c/doc/ix01.html>.
31. FRED A. L. N., JAIN A. K. Robust data clustering // Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, Minneapolis (USA), June 16–22, 2003. P. 128–136.
32. RAND W. M. Objective criteria for the evaluation of clustering methods // J. Amer. Statistical Association. 1971. V. 66, N 336. P. 846–850.
33. HUBERT L., ARABIE P. Comparing partitions // J. Classification. 1985. V. 2, iss. 1. P. 193–218.
34. JEL classification system / EconLit Subject Descriptors. 2016. [Electron. resource]. <https://www.aeaweb.org/econlit/jelCodes.php?view=jel>.



СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕТИ ЦИТИРОВАНИЯ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ

С. В. Бредихин, В. М. Ляпунов, Н. Г. Щербакова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 001.12+303.2

Исследуются спектральные методы анализа сети научных публикаций, организованной на отношении цитирования и представленной орграфом $G^D = (V, E)$. Сравниваются результаты работы двух спектральных алгоритмов кластеризации. Орграф G^D преобразуется в три неориентированных графа: $A + A^\top$ (граф G^U), $A \times A^\top$ (граф G^{bib}) и $A^\top \times A$ (граф G^{coc}); здесь A — матрица смежности G^D . Кластеризации графов G^U , G^{bib} и G^{coc} выполнены с помощью алгоритмов *WTR* и *LEV*. Агломеративный алгоритм *WTR* основан на матрице случайного блуждания $P = D^{-1}A$, алгоритм бикластеризации *LEV* — на матрице модульности. Для сравнения результатов разбиения используются индексы *NMI*, *RAND*, *ADJUSTED_RAND*. В результате исследования выявлена зависимость результатов кластеризации от способа приведения G^D к неориентированному виду; кластеры журналов, построенные с помощью алгоритма *WTR*, могут быть проинтерпретированы в терминах принадлежности к тематическим областям. Результаты представлены в виде таблиц.

Ключевые слова: сеть цитирования журналов, сеть коцитирования, сеть библиографического сочетания, взвешенный ориентированный граф, разбиение графа, спектральная кластеризация.

Введение. Рассматривается задача разбиения множества вершин неориентированного связного графа $G = (V, E)$ на непересекающиеся подмножества (кластеры) $C^k = \{C_1, \dots, C_k\}$, такие что число ребер внутри кластеров велико по сравнению с числом ребер между кластерами. Кластер C_h можно отождествлять с индуцированным подграфом $G[C_h] = (C_h, E(C_h))$, где $E(C_h) := \{(u, v) \in E \mid u, v \in C_h\}$. Тогда $E(C) := \cup_h E(C_h)$ ($h = 1, \dots, k$) является множеством внутрикластерных ребер, а $\neg E(C) := E - E(C)$ — множеством межкластерных ребер. Разбиение на два кластера $C^2 = \{C_1, C_2\}$, $C_2 = V - C_1$ называется разрезом, а число межкластерных ребер $Cut(C_1, C_2)$ — размером разреза. Разрез с минимальным значением Cut называется минимальным разрезом [1]. Если граф взвешенный, то Cut определяется как сумма весов межкластерных ребер. Разбиение на два кластера будем называть бикластеризацией. По аналогии разбиение на k кластеров с минимальным значением Cut будем называть минимальным k -разрезом или k -кластеризацией.

Если задачу разбиения множества вершин G на кластеры представить как задачу определения минимального разреза, то решение будет тривиальным, поскольку Cut минимально, если поместить все вершины в один кластер. Отсюда вытекает требование к числу кластеров. Кроме того, нежелательно сокращать размер разреза за счет деления на небольшие кластеры. Поэтому предлагаемые алгоритмы разбиения должны балансировать между размером разреза и числом кластеров.

Решение подобных задач опирается на результаты анализа матрицы смежности G , для изучения структурных свойств которой, как правило, используются спектральные методы. Пусть $A = (A_{ij})$ — матрица смежности неориентированного графа $G = (V, E)$, $|V| = n$ (вершины занумерованы), $|E| = m$. Заданы желаемое число кластеров k и верхняя и нижняя границы размеров кластеров: $\forall (h, 1 \leq h \leq k) L_h \leq |C_h| \leq W_h$. Требуется найти сбалансированное разбиение C^k , при котором размеры кластеров находятся в нужных границах и которое минимизирует функцию

$$Cut = f(C^k) = 1/2 \sum_{h=1}^k E_h, \text{ где } E_h = \sum_{v_i \in C_h} \sum_{v_j \notin C_h} A_{ij}, \quad (1)$$

т. е. E_h — сумма весов ребер разреза, соответствующих кластеру C_h [2] (множитель $1/2$ возникает из-за того, что каждое ребро учитывается дважды). Задача нахождения сбалансированного разбиения является NP-полной [3]. Использование алгоритмов полиномиальной сложности неприемлемо для больших сетей, поэтому рассматриваются приближенные методы решения задачи.

К задаче (1) для неориентированного графа может быть сведена любая задача кластеризации множества объектов x_1, \dots, x_n , для которых установлена мера подобия $s_{ij} = s(x_i, x_j)$, согласно некоторой функции подобия, являющаяся симметричной и неотрицательной. Соответствующая матрица подобия $S = (s_{ij})$. Представление данных в форме “графа подобия”: объекту x_i соответствует вершина v_i (считаем, что вершины занумерованы и далее пользуемся номерами вершин), если $s_{ij} > 0$, то ребро (i, j) имеет вес s_{ij} . Взвешенную матрицу смежности соответствующего графа обозначаем A и далее рассматриваем задачу кластеризации как задачу разбиения графа. Аналогично, к задаче (1) для орграфа может быть сведена задача кластеризации объектов x_1, \dots, x_n , для которых установлено несимметричное отношение.

1. Кластеризация на основе матрицы Лапласа. Существуют различные варианты спектральной кластеризации, основанные на вычислении собственных векторов матрицы смежности [4–7]. Использование матрицы Лапласа обусловлено рядом ее важных свойств, отражающих структурные особенности графа [8, 9].

Рассмотрим задачу кластеризации $C^2 = \{C_1, C_2\}$ вершин неориентированного невзвешенного связного графа $G = (V, E)$ с $(0, 1)$ матрицей смежности A . Воспользуемся рассуждениями, приведенными в работе [10]. Здесь и далее предполагаем, что граф не имеет кратных ребер и петель. Разбиение можно представить с помощью индикаторного вектора (индекс-вектора) \mathbf{s} с элементами

$$s_i = \begin{cases} +1, & \text{если } i \in C_1 \\ -1, & \text{если } i \in C_2. \end{cases} \quad (2)$$

Заметим, что $\mathbf{s}^\top \mathbf{s} = n$. Тогда

$$\frac{1}{2}(1 - s_i s_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } (i \in C_1 \text{ and } j \in C_2) \text{ or } (i \in C_2 \text{ and } j \in C_1), \\ 0, & \text{если } (i, j \in C_1) \text{ or } (i, j \in C_2). \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, (1) можно представить в виде

$$Cut = \frac{1}{4} \sum_{i,j} (1 - s_i s_j) A_{ij}.$$

Определим степень вершины i :

$$\deg_i = \sum_j A_{ij}.$$

Представим сумму элементов матрицы с учетом того, что $s_i^2 = 1$, как

$$\sum_{i,j} A_{ij} = \sum_i \deg_i = \sum_i s_i^2 \deg_i = \sum_{i,j} s_i s_j \deg_i \delta_{ij},$$

где $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$ в противном случае. Тогда

$$Cut = \frac{1}{4} \sum_{i,j} s_i s_j (\deg_i \delta_{ij} - A_{ij}).$$

Отсюда

$$Cut = \frac{1}{4} \mathbf{s}^\top L \mathbf{s}, \quad (4)$$

где L — симметричная матрица с элементами $L_{ij} = \deg_i \delta_{ij} - A_{ij}$, т. е.

$$L_{ij} = \begin{cases} \deg_i, & i = j, \\ -1 & i \neq j \text{ и } A_{ij} = 1, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, L — матрица Лапласа ($L = D - A$, где D — диагональная матрица, $D_{ii} = \deg_i$).

Представим \mathbf{s} как сумму нормализованных собственных векторов \mathbf{v}_i матрицы L :

$$\mathbf{s} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{v}_i,$$

где $\alpha_i = \mathbf{v}_i^\top \mathbf{s}$, так как $\mathbf{s}^\top \mathbf{s} = n$, имеем:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = n. \quad (6)$$

Отсюда

$$Cut = \sum_i \alpha_i \mathbf{v}_i^\top L \sum_j \alpha_j \mathbf{v}_j = \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j \lambda_j \delta_{ij} = \sum_i \alpha_i^2 \lambda_i, \quad (7)$$

где λ_i — собственное значение матрицы L , соответствующее собственному вектору \mathbf{v}_i с учетом того, что $\mathbf{v}_i^\top \mathbf{v}_j = \delta_{ij}$ (если векторы нормализованы, то $\mathbf{v}_i^\top \mathbf{v}_i = 1$). Будем считать, что собственные значения упорядочены по неубыванию:

$$\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n; \quad (8)$$

а $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n$ — соответствующие собственные векторы.

Теперь задача минимизации Cut (1) может быть сформулирована как задача выбора неотрицательных величин α_i^2 (см. (7)) так, чтобы “большие” значения соответствовали “малым” собственным значениям, а “малые” — “большим”, и в то же время выполнялось (6).

Сумма каждой строки матрицы L равна нулю:

$$\sum_j L_{ij} = \sum_j (deg_i \delta_{ij} - A_{ij}) = deg_i - deg_i = 0.$$

Таким образом, вектор $\mathbf{v} = (1, 1, \dots, 1)$ является собственным вектором матрицы L , соответствующим собственному значению ноль. У матрицы L все собственные значения неотрицательны, поэтому значение ноль является минимальным, $\lambda_1 = 0$. Такой выбор эквивалентен помещению всех вершин в один кластер, но это решение не представляет интереса.

Рассмотрим вариант разделения на два кластера размеров n_1 и n_2 , тогда:

$$\alpha_1^2 = (\mathbf{v}_1^\top \mathbf{s})^2 = \frac{(n_1 - n_2)^2}{n}.$$

Поскольку нет возможности варьировать этот коэффициент, то обращаем внимание на другие элементы суммы (7). Если нет другого ограничения на \mathbf{s} , кроме $\mathbf{s}^\top \mathbf{s} = n$, то Cut может быть минимизирован выбором \mathbf{s} , пропорциональным второму минимальному собственному вектору \mathbf{v}_2 матрицы L . Граф связный, поэтому λ_2 (8) отлично от нуля (так как кратность значения ноль соответствует числу связных компонент [11]). Тогда (7) зависит от λ_2 , остальные члены суммы будут равны нулю ввиду ортогональности собственных векторов L . Согласно (2) элементы \mathbf{s} равны либо $+1$, либо -1 , т. е. вектор \mathbf{s} может быть не параллелен \mathbf{v}_2 . Путем аппроксимации можно определить \mathbf{s} так, чтобы вектор был “почти” параллелен \mathbf{v}_2 . Это эквивалентно максимизации модуля:

$$|\mathbf{v}_2^\top \mathbf{s}| = \left| \sum_i v_2(i) s_i \right| \leq \sum_i |v_2(i)|, \quad (9)$$

где $v_2(i)$ — элемент i вектора \mathbf{v}_2 . Неравенство (9) следует из неравенства треугольника, равенство достигается, если все члены первой суммы имеют одинаковый знак. Другими словами, максимум $|\mathbf{v}_2^\top \mathbf{s}|$ достигается, когда $v_2(i)s_i \geq 0$ для всех i , что эквивалентно тому, что сомножители имеют один знак:

$$s_i = \begin{cases} +1, & \text{если } v_2(i) \geq 0, \\ -1, & \text{если } v_2(i) < 0. \end{cases}$$

В случае произвольного размера кластеров разделение производится на основании знаков элементов вектора \mathbf{v}_2 . Для кластеров фиксированного размера n_1, n_2 следует упорядочить элементы \mathbf{v}_2 от наибольших положительных до наименьших отрицательных и распределить согласно размерам.

Базовую схему спектральной бикластеризации S_1 можно представить в виде:

Шаг 1 S_1 . Построить матрицу Лапласа L (см. (5)).

Шаг 2 S_1 . Найти второй минимальный собственный вектор, являющийся решением уравнения $L\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}$.

Шаг 3 S_1 . $C_1 = \{i; v_2(i) \geq 0\}; C_2 = \{i; v_2(i) < 0\}$.

Увеличения числа кластеров можно достичь итерационным процессом.

Схему S_2 спектральной k -кластеризации можно представить следующим образом:

Шаг 1 S_2 . Построить матрицу Лапласа L .

Шаг 2 S_2 . Вычислить k первых собственных векторов $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_k$ матрицы L .

Шаг 3 S_2 . Построить матрицу $M \in \mathbb{R}^{n \times k}$, в качестве столбцов которой выступают векторы $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_k$.

Шаг 4 S_2 . Построить $y_i \in \mathbb{R}^k (i = 1, \dots, n)$ — вектор, соответствующий i -й строке матрицы M . Применить алгоритм кластеризации (например, k -средних) к точкам \mathbf{y}_i (соответствующим вершинам) в пространстве \mathbb{R}^k для получения кластеров C_1, \dots, C_k . Подобная схема использовалась, например, в работах [12, 13].

2. Нормализованная кластеризация. Нормализация разреза является одним из способов предотвратить тенденцию разделения графа на небольшие изолированные кластеры. Существуют несколько приемов нормализации, например, в работе [14] представлено отношение $\frac{Cut(C_1, C_2)}{\min(|C_1|, |C_2|)}$, в работе [15] — отношение $\frac{Cut(C_1, C_2)}{|C_1| \times |C_2|}$. В работе [16] предложен нормализованный разрез:

$$Ncut(C_1, C_2) = \left(\frac{1}{vol(C_1)} + \frac{1}{vol(C_2)} \right) Cut(C_1, C_2),$$

где $vol(C) = \sum_{i \in C} deg_i, C \subset V$. Разрез $Ncut$ оценивает доли размера разреза относительно всех связей каждого кластера.

Кластеризация производится на основании второго минимального вектора, являющегося решением обобщенного уравнения:

$$L\mathbf{v} = \lambda D\mathbf{v}. \quad (10)$$

Уравнение (10) приводится к стандартному виду $D^{-1/2}LD^{-1/2}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}$, матрица $L^{sym} = D^{-1/2}LD^{-1/2}$ называется симметрично-нормализованной матрицей Лапласа. В работе [16] утверждается, что если λ^L — второе минимальное (8) собственное значение L^{sym} , а \mathbf{v}^L — соответствующий ему собственный вектор и существует разбиение $C^2 = \{C_1, C_2\}$, такое что

$$v_i^L = \begin{cases} \alpha, & \text{если } i \in C_1, \\ \beta, & \text{если } i \in C_2, \end{cases}$$

то разбиение оптимальное и $Ncut(C_1, C_2) = \lambda^L$. Таким образом, схема нормализованной бикластеризации совпадает со схемой S_1 за тем исключением, что вместо матрицы L используется матрица L^{sym} .

Схема S_3 нормализованной k -кластеризации аналогична схеме S_2 и отличается тем, что k минимальных собственных векторов являются решением обобщенного уравнения (10).

В работе [17] рассматривается интерпретация нормализованной спектральной кластеризации с точки зрения дискретного случайного блуждания. Если нормализовать взвешенную матрицу A по строкам, то получим стохастическую матрицу:

$$P = D^{-1}A, \quad (11)$$

которая характеризует Марковский процесс случайного блуждания, P_{ij} — вероятность перехода из вершины i в вершину j за один шаг. Предполагается, что все вершины имеют ненулевые взвешенные степени. Пусть

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \quad (12)$$

упорядоченные по невозрастанию собственные значения матрицы P , а $\mathbf{v}_1 = \mathbf{1}$, $\mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ — соответствующие им собственные векторы, т. е. решения уравнения

$$P\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}. \quad (13)$$

В работе [17] показано, что если λ, \mathbf{v} являются решением (13) и $P = D^{-1}A$, то пара $((1-\lambda), \mathbf{v})$ является решением (10). Другими словами, спектральная проблема, сформулированная алгоритмом *Ncut*, и проблема собственных значений/векторов стохастической матрицы P эквивалентны. При этом минимальный вектор для (10) соответствует максимальному вектору (13). Там же приведена схема S_4 нормализованной k -кластеризации на основе матрицы случайного блуждания:

Шаг 1 S_4 . Построить матрицу P .

Шаг 2 S_4 . Вычислить k наибольших собственных векторов $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_k$ матрицы P .

Шаг 3 S_4 . Построить матрицу $M \in \mathbb{R}^{n \times k}$, в качестве столбцов которой выступают векторы $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_k$.

Шаг 4 S_4 . Построить $\mathbf{y}_i \in \mathbb{R}^k$ ($i = 1, \dots, n$) — вектор, соответствующий i -й строке матрицы M .

Шаг 5 S_4 . Применить алгоритм кластеризации, например k -средних, к \mathbf{y}_i для получения кластеров C_1, \dots, C_k .

Спектральная кластеризация способна группировать вершины согласно подобию вероятностей переходов между подмножествами вершин. Т. е. если множество V разделено на две части, то случайное блуждание, начавшееся в одной из частей, имеет тенденцию оставаться в ней. Связь стационарного распределения с кластеризацией используется в работе [18]. Стационарное распределение рассматривается как показатель частоты посещения каждой вершины графа.

Матрица P (11) используется также в механизме k -кластеризации, предложенном в статье [19]. Определяется расстояние между вершинами графа:

$$r_{ij}(t) = \sqrt{\sum_{l=1}^n \frac{(P_{il}^t - P_{jl}^t)^2}{deg_l}},$$

где P_{il}^t — вероятность перехода из вершины i в вершину l за t шагов, deg_l — степень вершины l . Показано, что если собственные значения матрицы P упорядочены согласно (12), а $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n$ — соответствующие им собственные векторы, то для достаточно больших t имеет место равенство

$$r_{ij}(t) = \sum_{l=2}^n \lambda_l^{2t} (v_l(i) - v_l(j))^2,$$

где $v_l(i)$ — элемент i вектора \mathbf{v}_l . Затем определяется r_{iC} — расстояние между вершиной i и кластером C . Строится иерархический объединяющий алгоритм, основанный на методе Уорда [20], рассматривающем в качестве кандидатов на объединение $C_3 = C_1 \cup C_2$ “близко” расположенные кластеры. В данном случае на каждом шаге в качестве таких кандидатов рассматриваются пары смежных кластеров. Минимизируется выражение

$$\frac{1}{n} \left(\sum_{i \in C_3} r_{iC_3}^2 - \sum_{i \in C_1} r_{iC_1}^2 - \sum_{i \in C_2} r_{iC_2}^2 \right).$$

Алгоритм *WTR*, применяемый в нашей работе, использует эту технику.

3. Кластеризация на основе матрицы модульности. В работе [21] задача оптимального разбиения графа рассматривается как максимизация числа ребер внутри кластеров. Понятие “модульности” базируется на предположении, что структура изучаемого графа, как правило, отличается от структуры случайного графа. Определяется функция

$$Q = N_1 - N_2, \quad (14)$$

где N_1 — число ребер внутри кластеров, N_2 — ожидаемое число таких ребер. Функция Q названа “модульностью”, большие значения указывают на тесную взаимосвязь внутри кластеров. Вычисление модульности де-факто является способом проверки качества разбиения вершин графа, см. [19, 22–24].

Ожидаемое число ребер N_2 вычисляется согласно “нуль-модели” графа, который имеет то же число вершин и может быть разделен на то же число кластеров, что и анализируемый граф. Вероятность наличия ребра (i,j) в модели обозначим P_{ij} . Формула (14) может быть представлена в виде:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} (A_{ij} - P_{ij}) \delta(C_i, C_j), \quad (15)$$

где C_i — кластер, в который попадает вершина i , $\delta(r,s) = 1$, если $r = s$. Выбор P_{ij} ограничен по следующим причинам: во-первых, поскольку рассматривается неориентированный граф, то $P_{ij} = P_{ji}$; во-вторых, предполагается, что $Q = 0$, если все вершины попадают в один кластер, т. е.

$$\sum_{i,j} (A_{ij} - P_{ij}) = 0.$$

Отсюда

$$\sum_{i,j} P_{ij} = \sum_{i,j} A_{ij} = 2m. \quad (16)$$

Ожидаемая степень вершины i задается выражением $\sum_j P_{ij}$; в предположении, что ожидаемая степень вершины приближается к реальной, имеем:

$$\sum_j P_{ij} = \deg_i.$$

Далее в качестве нуль-модели рассматривается модель случайного графа с фиксированной степенной последовательностью (см. [25–27]):

$$P_{ij} = \frac{\deg_i \deg_j}{2m}.$$

Рассмотрим задачу бикластеризации. Согласно (2), (3) имеем:

$$\delta(C_i, C_j) = \frac{1}{2}(s_i s_j + 1).$$

Теперь (15) можно представить в виде:

$$Q = \frac{1}{4m} \sum_{i,j} (A_{ij} - P_{ij})(s_i s_j + 1) = \frac{1}{4m} \sum_{i,j} (A_{ij} - P_{ij}) s_i s_j.$$

Второе равенство вытекает из (16). В матричной форме:

$$Q = \frac{1}{4m} \mathbf{s}^\top B \mathbf{s}, \quad (17)$$

где B — симметричная матрица с элементами:

$$B_{ij} = A_{ij} - P_{ij}.$$

Матрица B называется матрицей модульности. В работе [10] представлен метод спектральной кластеризации на основе матрицы B , которая выполняет ту же роль, что и матрица Лапласа: уравнение (17) соответствует (4). Показано, что на основе собственного вектора, соответствующего наибольшему положительному собственному значению матрицы B , можно произвести бикластеризацию согласно знакам элементов собственного вектора.

4. Вычислительный эксперимент. Выше была представлена методика спектрального анализа, послужившая основой для алгоритмов кластеризации *WTR* и *LEV*. Цель эксперимента состояла в сравнении результатов работы указанных алгоритмов по выявлению сообществ в множестве научных журналов, размещенных в одной библиографической базе данных.

В качестве исходных данных выступает сеть цитирования журналов, построенная на основе информации о цитировании, извлеченной из БД *RePEc* [28]. Сеть представляется взвешенным орграфом без кратных ребер и петель. Анализируется главная компонента $G = (V, E)$, $|V| = 1729$, $|E| = 135702$, с взвешенной матрицей смежности A . Поскольку алгоритмы предназначены для неориентированных графов, преобразуем орграф G в неориентированный тремя способами (см. [29]). В результате были получены три неориентированных графа, которые были использованы в эксперименте:

а) граф G^U , представлен матрицей смежности $A + A^\top$, $|E(G^U)| = 116190$ (пары разнонаправленных дуг заменяются одним ребром с суммарным весом);

б) граф G^{bib} , соответствующий “сети библиографического сочетания”, представлен нормализованной матрицей AA^\top , без учета одиночных вершин $|V(G^{bib})| = 1432$, $|E(G^{bib})| = 844476$;

в) граф G^{coc} , соответствующий “сети коцитирования”, представлен нормализованной матрицей $A^\top A$, без учета одиночных вершин $|V(G^{coc})| = 1582$, $|E(G^{coc})| = 820982$.

Алгоритм *WTR* реализует метод, предложенный в статье [19]. Работа начинается с разбиения $R_1 = \{\{v\}, v \in V\}$, каждая вершина является кластером. Вычисляются все расстояния между всеми смежными вершинами. На шаге k :

1. Выбираются два кластера C_1, C_2 , слияние которых приводит к минимальному увеличению целевой функции (27);

2. Образуется новый кластер $C_3 = C_1 \cup C_2$ и новое разбиение $R_{k+1} = (R_k \setminus \{C_1, C_2\}) \cup \{C_3\}$;

3. Обновляются расстояния между смежными кластерами.

На шаге $n - 1$ алгоритм заканчивает работу, при этом $R_n = \{V\}$. На каждом шаге вычисляется Q (15). Лучшим считается разбиение с максимальным значением Q . Сложность вычислений оценивается как $\mathcal{O}(|E||V|^2)$, для разреженного графа — $\mathcal{O}(|V|^2 \log |V|)$.

Таблица 1

Размеры кластеров графа G^U

<i>WTR</i>		<i>LEV</i>	
# <i>Cl</i>	# <i>J</i>	# <i>Cl</i>	# <i>J</i>
1	692	1	1549
1	280	1	180
1	270		
1	183		
1	76		
1	62		
1	44		
2	8		
1	4		
1	2		

Таблица 2

Тематика кластеров графа G^U , алгоритм *WTR*

# <i>J</i>	Тематика	Коды <i>Jel</i>
183	Сельское хозяйство, ресурсы, экология	Q
76	Здравоохранение, соц. обеспечение	I
62	Транспортная экономика, администрирование	R
44	Эконометрические и статистические методы	C1
8	Образование	A2, I2

Алгоритм *LEV* является реализацией метода, предложенного в статье [10]. Это итерационный процесс деления множества вершин на две части. На шаге k :

1. Для графа/выбранного подграфа строится матрица модульности B ;
2. Вычисляется вектор, соответствующий наибольшему по абсолютной величине собственному значению; если это значение β_n положительно, то собственный вектор искомый; если отрицательно, то повторяем вычисление для матрицы $B - \beta_n I$ (где I — единичная матрица);
3. Кластер делится на две части соответственно знакам элементов найденного собственного вектора.
4. Проверяется, увеличилось ли значение модульности исходного графа; если да, то считаем разделение правомерным и переходим к шагу 1.

Алгоритм *LEV* заканчивает работу, если значение Q не увеличивается или ни один кластер невозможно разделить на две части. Кластер невозможно разделить на части, если все собственные значения, кроме нулевого, отрицательны. Сложность *LEV* оценивается как $\mathcal{O}(|E| + |V|^{2 \times \text{steps}})$, где *steps* — число шагов деления на два сообщества. Алгоритмы *WTR* и *LEV* реализованы с помощью библиотеки *C* пакета *igraph* [30].

4.1. *Кластеризация* G^U . В табл. 1 приведены размеры кластеров, полученных в результате исполнения алгоритмов *WTR* и *LEV* в применении к графу G^U . Здесь и далее одновершинные кластеры не включаются в таблицы, так, при кластеризации *WTR* число одновершинных кластеров равно ста; #*Cl* — число кластеров размера #*J*. Для сравнения результатов кластеризации использовались три индекса согласованности: *NMI* [31], *RAND* [32] и *ADJUSTED_RAND* (*ARI*) [33]. Индексы согласованности выглядят так: *NMI* = 0,12; *RAND* = 0,38; *ARI* = 0,07. Очевидно, что сходство минимальное.

При кластеризации с помощью алгоритма *LEV* 89,6 % журналов (1549) попали в один кластер, что не позволяет интерпретировать результаты. Однако с помощью алгоритма *WTR* были выделены тематические области (табл. 2.) на основе ключевых слов в названиях журналов и классификатора *Jel* [34]. Интерпретируемым результатом будем считать

Таблица 3

Размеры кластеров графа G^{bib}

<i>WTR</i>		<i>LEV</i>	
# <i>Cl</i>	# <i>J</i>	# <i>Cl</i>	# <i>J</i>
1	718	1	486
1	369	1	339
1	288	1	316
1	30	1	291
1	25		

Таблица 4

Тематика кластеров графа G^{bib} , алгоритм *WTR*

# <i>J</i>	Тематика	Коды <i>Jel</i>
369	Математические методы, бизнес-экономика, экономическое развитие, ресурсы, транспортная экономика	C, M, O, Q, R
288	Общая экономика, математические методы, финансовая экономика	A, C, G
30	Математические методы	C
25	Математические методы, организация производства	C, L

кластеризацию, которая позволяет соотнести кластер с 1–2 тематическими областями. Несмотря на различные результаты, 69 % журналов, входящих в *WTR* кластер, имеющий размер 183 (см. табл. 1, столбец 2, строка 4) входят в *LEV* кластер, имеющий размер 180 (см. табл. 1, столбец 4, строка 2). Если сравнивать алгоритмы по размеру разреза графа G^U , то в результате разбиения *LEV* размер разреза меньше. Такое соотношение сохраняется для нормализованных разрезов, определенных согласно [14, 16]. Нормализация согласно [15] дает меньшее значение для разбиения *WTR*.

4.2. *Кластеризация* G^{bib} . Размеры кластеров, полученных в результате кластеризации G^{bib} алгоритмами *WTR* и *LEV*, представлены в табл. 3. Индексы согласованности имеют вид: $NMI = 0,77$; $RAND = 0,84$; $ARI = 0,53$. Если сравнивать алгоритмы *WTR* и *LEV* по размеру разреза графа G^{bib} , то в результате разбиения *WTR* размер разреза меньше. Такое соотношение сохраняется для нормализованного разреза, определенного согласно [15]. Нормализация согласно [14] и [16] дает меньшее значение для разбиения *LEV*. Тематика *WTR* кластеров представлена в табл. 4.

4.3. *Кластеризация* G^{coc} . Размеры кластеров, полученных в результате кластеризации G^{coc} представлены в табл. 5. Индексы согласованности имеют вид: $NMI = 0,57$; $RAND = 0,74$; $ARI = 0,3$. Согласованность алгоритмов ниже, чем при кластеризации графа G^{bib} .

Заключение. Цель работы состояла в сравнении спектральных методов кластеризации коллекции научных журналов БД RePEc, связанных отношением цитирования. Задача кластеризации представлена как задача минимизации сбалансированного разреза соответствующего графа. Проанализирована связь определения целевой функции и матрицы, на основе собственных векторов которой достигается оптимизация, а именно, обоснованность применения матриц Лапласа, случайного блуждания и модульности.

Реализованы алгоритмы спектральной кластеризации *WTR* и *LEV*. Исследованы результаты их работы для графов G^U , G^{bib} и G^{coc} . Проведенное исследование позволяет заключить, что для рассматриваемой сети цитирования журналов больше подходит спектральная кластеризация алгоритмом *WTR* на основе матрицы случайного блуждания. Приемлемую согласованность рассматриваемые алгоритмы достигли при кластеризации графа G^{bib} . В свою очередь, граф G^U лучше поддается кластеризации, чем два других варианта преобразования исходного орграфа. Анализ показал, что кластеры большого

Таблица 5

Размеры кластеров графа G^{soc}

<i>WTR</i>		<i>LEV</i>	
# <i>Cl</i>	# <i>J</i>	# <i>Cl</i>	# <i>J</i>
1	517	1	675
1	350	1	459
1	255	1	448
1	235		
1	118		
1	32		
1	30		
1	9		
9	< 9		

Таблица 6

Тематика кластеров графа G^{soc} , алгоритм *WTR*

# <i>J</i>	Тематика	Коды <i>Jel</i>
350	Финансовая экономика, бизнес-экономика, транспортная экономика	E, G, M, R
255	Транспортная экономика, бизнес-экономика	R, M
235	Математические методы, организация производства, экономическое развитие, ресурсы	C, L, O, Q
118	Восточная Европа	A, M
32	Румыния	
30	Математические методы	C
9	Восточная Европа	

размера ($|C_i| > 200$) не удается классифицировать согласно 1–2 тематикам. При кластеризации графа коцитирования алгоритмом *WTR*, кроме тематических сообществ, выделены сообщества журналов, связанных по территориальному признаку издательств. Отметим, что большинство кластеров, кроме журналов основных тематик, содержат журналы, относящиеся к “математическим методам” (*Jel* код C). Выявленна зависимость результатов кластеризации от применяемого алгоритма, способа преобразования орграфа в неориентированный граф и способа нормализации размера разреза.

Список литературы

1. Brandes U., Gaertler M., Wagner D. Experiments on graph clustering algorithms // Proc. of the 11th Annual European Symposium on Algorithms (ESA'03). 2003. P. 568–579.
2. Alpert C. J., Yao S.-Z. Spectral partitioning: The more eigenvectors, the better // Proc. of the 32nd annual ACM/IEEE Design Automation Conference. 1995. P. 195–200.
3. Garey R. R., Johnson D. S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. 1990. NY: W. H. Freeman & Co.
4. Gould P. The Geographical Interpretation of Eigenvalues // Institute of British Geographers Transactions. 1967. V. 42. P. 53–85.
5. Donath W. E., Hoffman A. Algorithms for partitioning of graphs and computer logic based on eigenvectors of connection matrices // IBM Technical Disclosure Bulletin. 1972. V. 15, iss. 3. P. 938–944.
6. Barnes E. An Algorithm for Partitioning the Nodes of a Graph // SIAM J. Alg. Disc. Math. 1982. V. 3, iss. 4. P. 541–550.
7. Sarkar S., Boyer K. L. Quantitative measures of change based on feature organization: Eigenvalues and eigenvectors // Computer Vision and Image Understanding. 1998. V. 71, N 1. P. 110–136.
8. Hall K. M. An r -dimensional Quadratic Placement Algorithm // Management Science. 1970. V. 17. P. 219–229.
9. Mohar B. The Laplacian Spectrum of Graphs. Graph Theory & Application. Wiley, 1991. P. 871–898.

10. Newman M. E. J. Finding community structure using the eigenvectors of matrices // Phys. Rev. E 74, 036104 (2006).
11. West D. B. Introduction to Graph Theory. Prentice Hall, 1996.
12. Donetti L., Muñoz A. Detecting network communities: a new systematic and efficient algorithm // J. of Statistical Mechanics. 2004. P. 10012.
13. Barnard S., Pothen A., Simon H. A spectral algorithm for envelope reduction of sparse matrices // Numer. Linear Algebra Appl. 1995. V. 2. P. 317–334.
14. Guattery S., Miller G. On the quality of spectral separators // SIAM J. Matrix Anal. Appl. 1998. V. 19. P. 701–719.
15. Wei Y.-C., Cheng C.-K. Toward efficient hierarchical designs by ratio cut partitioning // Proc. of the IEEE International Conference on Computer Aided Design. 1989. P. 298–301.
16. Shi J., Malik J. Normalized cut and image segmentation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. V. 22, iss. 8. P. 888–905.
17. Meila M., Shi J. A random walks view of spectral segmentation // Proc. International Workshop on AI and Statistics (AISTAT) 2001. [Electron. resource]. <https://dblp1.uni-trier.de/db/conf/aistats/aistats2001.html>.
18. Rosvall M., Bergstrom C. T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008. V. 105, N 4. P. 1118–1123.
19. Pons P., Latapy M. Computing communities in large networks using random walks // J. of Graph Algorithms and Applications. 2006. V. 10, N 2. P. 191–218.
20. Ward J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // J. of the American Statistical Association. 1963. V. 58, N 301. P. 236–244.
21. Newman M. E. J., Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks // Phys. Rev. 2004. E 69 (2) 026113.
22. Raghavan U. N., Albert R., Kumara S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks // Phys. Rev. E 76, 036106.
23. Brandes U., Delling D., Gaertler M., Gorke R., Hoefer M., Nikoloski Z., Wagner D. On Modularity Clustering // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2008. V. 20, iss. 2. P. 172–188.
24. Blondel V., Guillaume J., Lambiotte J., Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks // J. Stat. Mech. 2008, P10008.
25. Chung F., Lu L. Connected components in random graphs with given degree sequences // Annals of Combinatorics. 2002. V. 6. P. 125–145.
26. Luczak T. Sparse random graphs with a given degree sequence // Proc. of the Symposium on Random Graphs. Poznań, 1989. NY: John Wiley, 1992. P. 165–182.
27. Molloy M., Reed B. A critical point for random graphs with a given degree sequence // Random Structures and Algorithms. 1995. V. 6. P. 161–179.
28. RePEc. General principles. [Electron. resource]. <http://repec.org/>.
29. Бредихин С. В., Ляпунов В. М., Щербакова Н. Г. Кластерный анализ сети цитирования журналов // Проблемы информатики. 2017. № 3. С. 38–52.
30. igraph – The network analysis package. [Electron. resource]. <http://igraph.org/c/doc/ix01.html>.
31. Fred A. L. N., Jain A. K. Robust data clustering // Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, Minneapolis (USA), June 16–22, 2003. P. 128–136.
32. Rand W. M. Objective criteria for the evaluation of clustering methods // J. Amer. Statistical Association. 1971. V. 66, N 336. P. 846–850.
33. Hubert L., Arabie P. Comparing partitions // J. Classification. 1985. V. 2, iss. 1. P. 193–218.
34. Jel classification system / EconLit Subject Descriptors. 2016. [Electron. resource]. <https://www.aeaweb.org/econlit/jelCodes.php?view=jel>.



**Бредихин Сергей Все-
володович** — канд. техн. на-
ук, ведущий научный сотруд-
ник Ин-та вычислительной ма-
тематики и математической
геофизики СО РАН; e-mail:

bred@nsc.ru;

Сергей Бредихин окончил механико-ма-
тематический факультет Новосибирского госу-
дарственного университета в 1968 г. С 1968 г. —
сотрудник Института автоматики и электро-
метрии СОАН СССР. Кандидат технических
наук с 1983 г. В период 1988–2017 гг. руковод-
дил лабораторией ИВМ и МГ СО РАН. Испол-
нял обязанности технического директора про-
екта „Сеть Интернет Новосибирского научного
центра“. Лауреат государственной премии РФ
по науке и технике 2012 г. Сфера научных инте-
ресов: анализ и измерение распределенных ин-
формационных сетей. Автор и соавтор более
ста научных работ и двух монографий: "Методы
библиометрии и рынок электронной науч-
ной периодики", "Анализ цитирования в библио-
метрии".

Sergey Bredikhin — Ph.D. of Engineering
Sciences, Leading Researcher, Institute of Com-
putational Mathematics and Mathematical
Geophysics SB RAS, e-mail: bred@nsc.ru.

Sergey Bredikhin graduated from Novo-
sibirsk State University in 1968, faculty of Mech-
anics and Mathematics, and became an employee
of Institute of Automation and Electrometry
SB RAS. In 1983 he received Ph.D degree in En-
gineering Science. Since 1988 he was the head
of the laboratory of Computing Center (now
ICM&MG) SB RAS. He was the technical manager
of „Akademgorodok Internet Project“. He is the
state prize winner in science and engineering
RF at 2012. Since 2017 he is the leading re-
searcher of ICM&MG. Sphere of his scientific
interests — analysis and measurement of the
distributed information networks. He is the author
and co-author of more than hundred scientific
works and two monographs: "Metody bibliometrii
i rynok elektronnoy nauchnoy periodiki" "Analiz
tsitirovaniya v bibliometrii".



**Ляпунов Виктор Ми-
хайлович** — ведущий инже-
нер Ин-та вычислительной ма-
тематики и математической
геофизики СО РАН; e-mail:
vic@nsc.ru;

Виктор Ляпунов окончил
механико-математический фа-
культет Новосибирского государственного уни-
верситета в 1978 г. В 1978 г. стал сотрудни-
ком Вычислительного центра СОАН СССР, а
с 1990 г. — сотрудником Института систем ин-
форматики СО АН СССР. С 2004 г. — ведущий
инженер Института вычислительной ма-
тематики и математической геофизики СО РАН.
Занимается вопросами извлечения информации
из баз данных и обработкой больших массивов
данных. Соавтор более 10 работ в этой области.

Victor Lyapunov — Leading Software
Engineer, Institute of Computational Mathematics
and Mathematical Geophysics SB RAS, e-mail:
vic@nsc.ru.

Victor Lyapunov graduated from Novo-
sibirsk State University in 1978 (faculty of Me-
chanics and Mathematics). In 1978, he became
an employee of Computing Center of SB AS
USSR, since 1990 — an employee of Institute
of Informatics Systems SB RAS. Since 2004
he works as software engineer in Institute of
Computational Mathematics and Mathematical
Geophysics SB RAS. His current research interests
include methods of information extracting from
databases and processing of large data sets. He is
the co-author of more than 10 works in that area.



**Щербакова Наталия
Григорьевна** — старш. на-
уч. сотр. Ин-та вычислитель-
ной математики и математи-
ческой геофизики СО РАН; e-
mail: nata@nsc.ru.

**Наталия Щерба-
кова** окончила Новосибирский госу-
дарственный университет по специальному-
сти Математическая лингвистика в 1967 г.
С 1967 г. работала в Институте математики
СО АН СССР, затем — в Институте автома-
тики и электрометрии СО АН СССР в области
создания программного обеспечения систем пе-

редачи данных. С 2000 г. — сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, где с 2002 г. занимает должность старшего научного сотрудника. Являлась участником проекта “Сеть Интернет Новосибирского научного центра”, занималась вопросами мониторинга и анализа IP-сетей. Автор и соавтор более 40 работ, соавтор монографии “Анализ цитирования в библиометрии”. Научные интересы лежат в области исследования методов оценки научной деятельности на основе анализа цитирования научной литературы.

Natalia Scherbakova — Senior Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, e-mail: nata@nsc.ru.

Natalia Shcherbakova graduated from Novosibirsk State University in 1967 (mathematical linguistics). Since 1967 she worked at Institute of Mathematics SB RAS, then at Institute of Automation and Electrometry SB RAS in the field of software design for data transmission systems. In 2000 — the employee of Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, since 2002 works as senior researcher. She is a member of “Akademgorodok Internet Project”, dealt with software of monitoring and the analysis of IP networks. She is the author and co-author of more than 40 works, the co-author of the monograph “Ansliz tsitirovaniya v bibliometrii”. The current research interests lie in the field of bibliometrics: methods of measuring of scientific.

Дата поступления — 30.03.2018



SOFTWARE TOOLS FOR BUILDING AUTOMATED CONTROL SYSTEMS IN THE ENVIRONMENT OF THE DOMESTIC OPERATING SYSTEM

A. I. Blagodarniy

Institute of Computational Technologies of SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

In the article „Software tools for building automated control systems in the environment of the domestic operating system“ the construction, schemes of components interrelation and the tool nucleus of the SCADA-system on the platform of the Russian network real time operational system „Neutrino KPDA.10964-01“, which is being developed and accompanied by the Russian Ltd Company „SVD “Installed systems““ from St. Petersburg. Using the Russian operational system answers the task of import substitution of the programming provision, the importance of which is increasing because of geopolitical risks and the growing pressure of economic sanctions from unfriendly states.

The product being described in this article is the result of developing the SCADA-system „BLACART“, constructed at the ICT SB RAS and functioning in the environment of the operational system QNX 4.25. The denominated SCADA-system displayed high performance in dozens of realized systems of control in different branches of industry, as a rule, in dangerous production. The certificate of conformity and the resolution for its application at the mining enterprises were received.

As a result of relocating SCADA-system „Blacart“ onto the base of the „Neutrino“ operational system the structure of the SCADA-system hasn't been changed. It was only the programming key (code) which was changed, particularly, all applications of different system libraries of subprograms were carried out in POSIX-interoperable format. Having preserved the structure as well as the main characteristics and functional capabilities of the SCADA-system in the process of relocating it into the milieu of the „Neutrino“ system, it also became possible to keep up all of the previous product values that prove to have been efficient in the course of realized long-term control systems practice.

A newly-developed SCADA-system has been realized as a distributed computing technological network, which is simultaneously a local computing network on the basis of the network protocol „Qnet“ of the operational system „Neutrino“.

The software of the SCADA-system is a hierarchical association of two subsystems: the subsystem of the upper level and the one of the lower level, which has been put into operation at one or another unit(s) of the technological network. The subsystem of the upper level is the automatic work position of the operator, which includes the graphical interface of the operator and the operational and archive databases control system. The subsystem of the lower level realizes the interface with the monitoring and technological equipment control.

The elaboration or modification of a specific project of the automated control system over technological processes on the basis of newly-developed SCADA-system is reduced to the construction of the graphical interface of the operator with the help of the system application builder (graphics editor) „Application Builder Photon“ and to compiling a set of text configuration files of the upper and lower level subsystems.

All automated work positions of the operator are fully equal in status display operations and technological equipment control, their local database being synchronized between themselves. The absence of the dedicated data server in the technological network is the first and major peculiarity

of the SCADA-system software. Such an approach realizes the principle of multiple hot backup in automated control systems.

The described SCADA-system has been constructed and elaborated as a real time SCADA-system and is intended for automatizing technological processes, which put tough demands on the time of control system reaction to one or another event. A guaranteed little time of reacting to any single event is one more major peculiarity of the SCADA-system.

The safeguard of the newly developed SCADA-system from cyber-attacks can only be reached by tough monitoring of users' access to management in accordance with the categories as well as by blocking all of the functions of using the operational system (by the operators). The characteristics of the operational system „Neutrino“ itself also make safety possible. As for the vulnerability of the programming provision, it can be easily detected and neutralized as the programming key of the SCADA-system is open.

Key words: SCADA, import substitution of software, QNX, Neutrino.

References

1. Golushko S. K., Pishchik B. N., Cheido G. P., Shakirov S. R. Import substitution in the field of hardware and software complexes as a base for designing high quality automated control systems (APCS) // Abstracts of the International Conference „Topical issues of computing and applied mathematics–2015“, Novosibirsk, October 19-23, 2015, P. 113.
2. Makartchev V., Mikhailenko Yu., Podervyanskij R. Be careful — viruses // The military-political review. 2011. [Electron. res.]: <http://www.belvpo.com/ru/1159.html>.
3. Gritsai G., Timorin A., Goltsev Yu., Ilyin R., Gordeitchik S., Karpin A. Security of industrial systems numbered v2.1. [Electron. res.]: http://www.ptsecurity.ru/download/SCADA_analytics_russian.pdf.
4. [Electron. res.]: <http://www.kpda.ru/products/kpda10964/>.
5. Blagodarnij A. I., Karatishova L. S. Universal SCADA-system BLACART under the control of the operation system QNX // Problems of informatics. 2009. N 3. P. 62—67.
6. Blagodarnyj A. I. Osobennosti i opyt primeneniya nadezhnoj SCADA-sistemy Blakart // Tezisy Vserossijskoj konferencii „Industrialnye informacionnye sistemy“. IIS-2013. Novosibirsk, 24–28 sentyabrya 2013. S. 10.



ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А. И. Благодарный

Институт вычислительных технологий СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 004.9

Описывается архитектура, схемы взаимодействия компонент и инструментальное ядро SCADA-системы на платформе отечественной защищенной операционной системы реального времени „Нейтрино КПДА.10964-01“. Продукт является результатом развития SCADA-системы „Блакарт“, разработанной в ИВТ СО РАН и работавшей в среде ОС QNX 4.25. Указанная SCADA-система показала высокие эксплуатационные качества в десятках реализованных систем управления в различных отраслях промышленности, как правило, на опасных производствах. Использование сертифицированной отечественной операционной системы является нужным шагом в направлении киберустойчивости.

Ключевые слова: SCADA, импортозамещение программного обеспечения, QNX, Нейтрино.

Постановка задачи. Безопасность современного производства не в последнюю очередь обеспечивается надежностью применяемой автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП). Использование хороших архитектурных решений и разумно выбранной операционной среды позволяет строить АСУТП, отвечающие самым высоким требованиям по надежности. Но в последнее время все большую остроту приобретает вопрос устойчивости информационных систем к кибервоздействиям, как случайным, так и намеренным [1]. Намеренные воздействия могут быть двух типов: чисто внешние, проникающие в систему по используемым каналам связи, и внутренние, через „закладки“ в программно-аппаратных компонентах. Последствия несанкционированного вмешательства в деятельность АСУТП посредством кибервоздействий могут быть очень разрушительными, причем в роли злоумышленника может оказаться как физическое лицо, так и специально созданная структура недружественного государства [2].

По данным обзора [3], наиболее часто используемые в России зарубежные SCADA-системы „STEP7“, „WinCC“, „InTouch“, „Genesys“, помимо привлекательных функциональных характеристик, обладают и набором выявленных уязвимостей. То же самое относится и к широко используемым в России зарубежным операционным системам (ОС), например, операционным системам семейства „Windows Microsoft“.

С учетом этих обстоятельств единственным разумным решением является построение отечественной SCADA-системы на платформе отечественной же операционной системы, прошедшей сертификацию надежности. В качестве такой операционной системы целесообразно использовать Защищенную сетевую операционную систему реального времени „Нейтрино“ КПДА.10964-01, которую развивает и сопровождает отечественная компания

ООО „СВД „Встраиваемые системы“, город С.-Петербург [4]. Использование отечественной ОС отвечает задаче импортозамещения программного обеспечения, актуальность которой возрастает ввиду геополитических рисков и нарастающего давления экономических санкций со стороны недружественных государств.

Операционная система „Нейтрино“ удовлетворяет требованиям к средствам вычислительной техники по 3 классу защиты информации от несанкционированного доступа (система мандатной защиты), 2 уровню контроля отсутствия недекларируемых возможностей, что позволяет использовать указанную операционную систему в информационных и управляющих системах класса защищенности до 1Б включительно. В число ключевых особенностей этой операционной системы входит широкий набор наиболее передовых современных компьютерных технологий, обеспечивающих необходимое качество продукта, в том числе и возможность организации вычислительных процессов в многоядерной среде.

В качестве исходной SCADA-системы была взята отечественная SCADA-система реального времени „Блакарт“, работающая в среде операционной системы реального времени „QNX 4.25“. Указанная SCADA-система разработана в ИВТ СО РАН и реализована на ряде горно-шахтных предприятий Кузбасса. Практика многолетней эксплуатации SCADA-системы показала ее исключительную надежность [5, 6]. Созданные на основе SCADA-системы „Блакарт“ автоматизированные системы управления охватывают управлением разнородные технологические процессы: наземное и подземное энергоснабжение, контроль перемещения персонала в шахтах, управление протяженными цепочками ленточных конвейеров, водоотлив и т. п. Были получены сертификат соответствия и разрешение на применение на предприятиях горнодобывающей промышленности.

Архитектура SCADA-системы. Вновь разработанная SCADA-система реализована как распределенная вычислительная технологическая сеть, которая одновременно является и локальной вычислительной сетью на основе сетевого протокола „Qnet“ операционной системы „Нейтрино“.

В общем случае программное обеспечение SCADA-системы представляет собой иерархическое объединение двух подсистем: подсистемы верхнего уровня и подсистемы нижнего уровня, которые запущены на тех или иных узлах технологической сети. Программное обеспечение каждой подсистемы в составе SCADA-системы, в свою очередь, состоит из некоторого набора программных компонент, оформленных в виде независимых задач или процессов.

Подсистема верхнего уровня, запущенная на каком-либо узле технологической сети, порождает автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, выполняемое в графической оболочке Photon. Поскольку операционная система „Нейтрино“ является сетевой, то совершенно безразлично, на каких узлах технологической сети запущено программное обеспечение того или иного уровня.

Общая схема SCADA-системы представляет собой сетевую архитектуру. Она изображена на рис. 1 и отображает схему взаимодействия всех основных компонент с указанием направлений межзадачных потоков данных. Стрелками темного цвета указаны пути передачи сигналов управления, стрелкам светлого цвета соответствуют направления передачи сигналов состояния технологических объектов.

В подсистему верхнего уровня входят следующие компоненты:

- графический интерфейса оператора „ИФ“;
- управление базой данных „БД“;

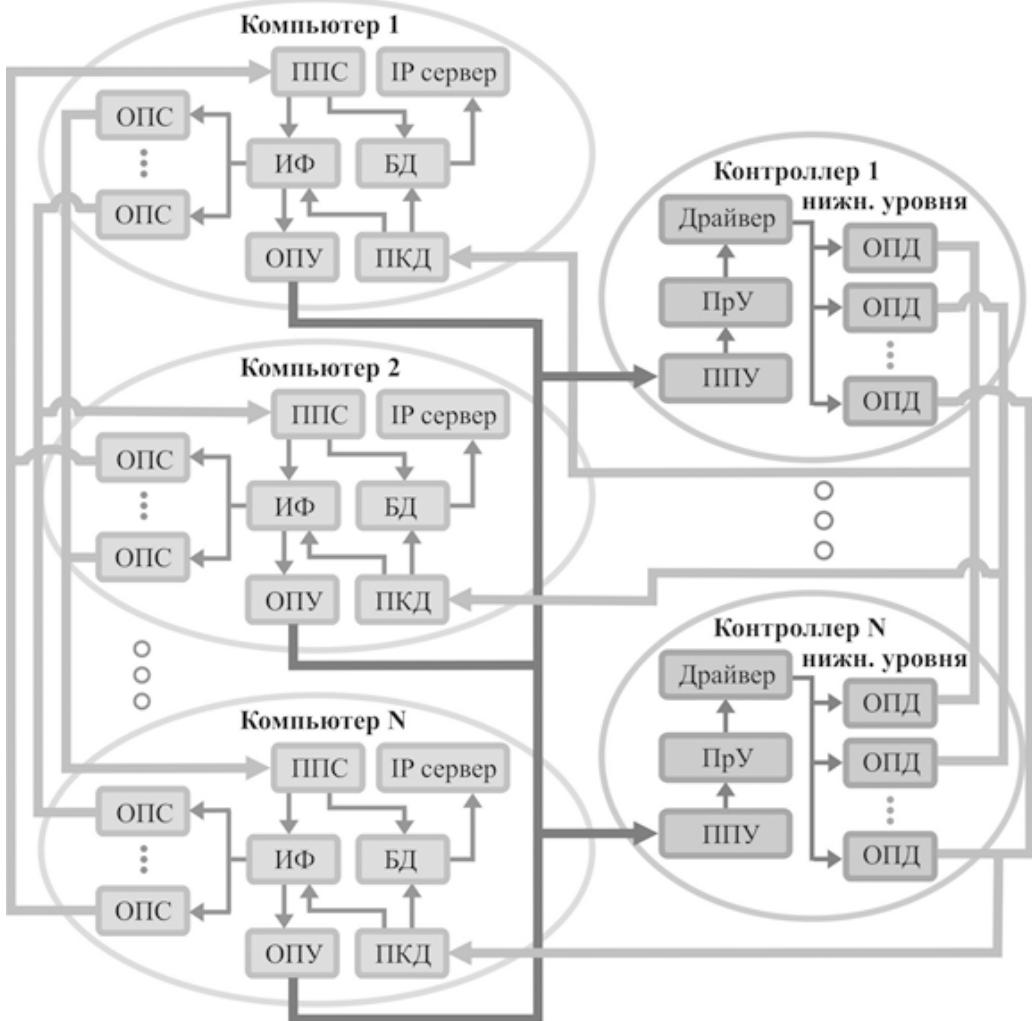


Рис. 1. Общая схема SCADA-системы

- задача „IPserver“ обмена данными со смежными АСУТП, работающими под управлением других операционных систем;
- задача передачи команд управления в подсистему нижнего уровня „ОПУ“;
- задача приема данных из подсистемы нижнего уровня „ПКД“;
- задача передачи данных в подсистемы верхнего уровня на других узлах технологической сети „ОПС“;
- задача приема данных из подсистем верхнего уровня на других узлах технологической сети „ППС“.

Основные функции графического интерфейса оператора включают в себя отображение на экране монитора состояния технологического оборудования с помощью выбранной системы графических знаков и удаленное управление объектами технологического оборудования подачей команд управления оператором, а также контроль входа/выхода персонала в систему.

Основное назначение задачи управления базой данных „БД“ — накопление информации о состоянии технологического оборудования, а также команд управления, протоко-

лирование действий оператора и предоставление максимально возможного сохранения и спектра услуг по обработке и визуализации сохраненной в базе данных информации.

База данных представляет собой набор файлов, состоящих из записей событий в их хронологическом порядке, т. е. упорядоченных по времени их поступления. Каждый файл содержит записи событий, произошедших за одни сутки, начиная с 0 часов. Файл записей за текущие сутки называется оперативным, остальные называются архивными файлами. Имена файлов базы данных образованы из префиксов „sPIT“ для дискретных сигналов, „iPIT“ для аналоговых сигналов, „ePIT“ для сводок энергоснабжения и „mPIT“ для сигналов системы наблюдения и оповещения персонала и шестизначного порядкового номера файла. В конце каждого суток текущий оперативный файл переходит в архивный файл с тем же именем и создается новый оперативный файл с порядковым номером, на единицу большим. Далее проверяется общее количество архивных файлов, и если оно превышает заданное, то файл с минимальным существующим номером удаляется.

Компоненты „ОПС“, „ОПУ“, „ПКД“, „ППС“ подсистемы верхнего уровня являются вспомогательными демпферными задачами. Основное назначение демпферных задач — предотвращение блокировки интерфейса оператора и базы данных по операциям приема/передачи данных и распараллеливание потоков данных на другие запущенные АРМ операторов. Механизм распараллеливания обеспечивает задача „ОПС“, которая для каждого АРМ оператора запускается столько раз, сколько имеется дополнительных узлов АРМ оператора. Каждая запущенная задача „ОПС“ передает сообщения протоколирования действий оператора на задачу „ППС“ другого заданного узла технологической сети. Количество подключаемых АРМ оператора ограничено лишь максимально допустимым количеством узлов в технологической сети.

Клиентские приложения АРМ оператора могут быть доступны и из других операционных систем, например, из „Windows NT/2000/XP/7/8“ с помощью утилиты „Phindows“ удаленного доступа, при этом для каждого пользователя в указанных операционных системах SCADA-система обеспечивает независимый раздельный доступ к клавиатуре и ручному манипулятору (мыши) для управления АРМ оператора.

Подсистема нижнего уровня образована драйверами — программами сопряжения с датчиками состояния и исполнительными реле управления технологическими объектами. Сюда же входят и драйверы интерфейса со смежными АСУТП — подсистемами других производителей, а также вспомогательные демпферные задачи („ПрУ“, „ППУ“, „ОПД“). Главное назначение демпферных задач — предотвращение блокировки драйверов по операциям приема/передачи данных и распараллеливание потоков данных на различные узлы подсистемы верхнего уровня. Механизм распараллеливания обеспечивает задача „ОПД“, которая для каждого драйвера запускается столько раз, сколько имеется узлов АРМ оператора приема данных, причем каждая задача „ОПД“ передает сигналы состояния технологического оборудования на задачу „ПКД“ одного заданного узла технологической сети.

Кроме рассмотренных выше задач, в состав программного обеспечения SCADA-системы включены также задачи синхронизации баз данных, диагностики состояния всех вычислительных машин технологической сети, диагностики состояния программного обеспечения на всех узлах той же технологической сети и диагностики состояния непосредственно самой локальной вычислительной сети. Вся указанная диагностика выводится на экраны мониторов всех АРМ оператора и записывается во все базы данных.

В процессе перевода SCADA-системы „Блакарт“ на платформу операционной системы „Нейтрино“ архитектура SCADA-системы не изменились. Изменился только программный код, в частности, все обращения к различным системным библиотекам подпрограмм сделаны в POSIX-совместимом формате. Сохранение структуры, основных свойств и функциональных возможностей SCADA-системы в процессе ее перевода в среду операционной системы „Нейтрино“ позволило сохранить все достоинства прежнего продукта, подтвержденные многолетней работой в реализованных системах управления.

Организация обмена данными в SCADA-системе. При построении вычислительной технологической сети SCADA-системы необходимо строго следовать следующему правилу: каждый компьютер, который является узлом технологической сети SCADA-системы, должен иметь строго фиксированное имя в формате „NodeXXX“, где десятичное число „XXX“ является номером узла.

Обмен данными между компонентами одной подсистемы на одном и том же узле технологической сети осуществляется через разделяемую оперативную память с использованием кольцевых буферов данных. Обмен данными между компонентами подсистем на различных узлах технологической сети осуществляется через сетевые POSIX-совместимые вызовы „READ/WRITE“. Для организации такого обмена каждая компонента, которая может принимать данные, оформляется в пространстве путевых имен технологической сети как администратор ресурсов со строго фиксированным именем, присваиваемым компоненте автоматически после ее запуска.

Для компонент подсистемы верхнего уровня это фиксированное имя имеет вид „decodXXX“, соответственно для компонент подсистемы нижнего уровня это имя имеет вид „recvXXX“, где выражение „XXX“ является десятичным номером узла, на котором запущена программная компонента. Следовательно, для организации обмена данными между компонентами SCADA-системы достаточно указать списки узлов технологической сети приема данных, как в командной строке запуска компонент подсистемы нижнего уровня, так и в панелях настройки АРМ операторов подсистемы верхнего уровня.

В SCADA-системе не используется контроль состояния технологических объектов методом опроса „сверху“. Инициаторами передачи всегда выступают подсистемы нижнего уровня, которые передают данные только в случае изменения текущего состояния контролируемого оборудования. Дополнительно, для обеспечения надежного контроля текущего состояния контролируемого оборудования, подсистемы нижнего уровня с некоторым, заранее заданным интервалом времени передают также полную совокупность всех сигналов состояния технологических объектов.

Поскольку сетевой протокол „Qnet“ операционной системы „Нейтрино“ обеспечивает надежную и неискаженную передачу пакетов данных, то в SCADA-системе не используются пакеты подтверждения приема данных. Исключение делается только для команд управления, которые возвращают пакет с кодом результата выполнения команды управления.

Используемые в SCADA-системе системы кодирования сигналов различны для подсистемы нижнего уровня и подсистемы верхнего уровня. Кодировка сигналов в подсистеме нижнего уровня отличается большей компактностью, что позволяет существенно улучшить сетевой трафик, т. е. увеличить скорость доставки пакетов данных в подсистему верхнего уровня. Кодировка сигналов в подсистеме верхнего уровня не является компактной, но зато очень хорошо приспособлена под объектно-ориентированное программирование, благодаря чему удается существенно уменьшить временные издержки на обработку

поступающих данных. Для обмена данными между подсистемами верхнего и нижнего уровней используется кодировка подсистемы нижнего уровня. Перекодирование сигналов в кодировку подсистемы верхнего уровня осуществляется программой подсистемы верхнего уровня „ПКД“.

Методы разработки конкретного проекта АСУТП. Разработка или модификация конкретного проекта АСУТП сводится к трем основным операциям:

- построение графического интерфейса оператора с помощью системного построителя приложений (графического редактора) „Application Builder Photon“;
- составление некоторого набора текстовых конфигурационных файлов подсистемы верхнего уровня;
- составление соответствующего набора текстовых конфигурационных файлов подсистемы нижнего уровня.

Задача интерфейса оператора „ИФ“ — единственная задача подсистемы верхнего уровня, которая подлежит модификации и настройке при разработке конкретного проекта АСУТП. Графический интерфейс оператора представляет собой набор видеокадров, каждый из которых является мнемосхемой некоторой части технологического оборудования или всего технологического оборудования (главный видеокадр). Графический интерфейс оператора также включает в себя набор панелей состояния и управления технологическим оборудованием.

Главный видеокадр постоянно находится на экране монитора. Остальные видеокадры вызываются оператором по мере необходимости, замещая друг друга и накладываясь на главный видеокадр. Основное отличие панелей состояния и управления технологическим оборудованием от видеокадров заключается в том, что на панелях отображается состояние только одного технологического объекта, и они вызываются на экран монитора в любом количестве и независимо друг от друга. Никаких ограничений на общее количество видеокадров и панелей состояния и управления и на распределение технологического оборудования по видеокадрам не существует. Единственное условие — главный видеокадр должен быть в обязательном порядке и только один.

Система управления базой данных (СУБД) также реализована в виде некоторого подмножества видеокадров и панелей графического интерфейса оператора, но эти графические объекты при разработке конкретного проекта АСУТП модификации не подлежат.

Все графические объекты в построителе приложений „Application Builder Photon“, а к ним относятся как видеокадры и панели, так и совокупность графических знаков на видеокадрах и панелях, имеют имена (теги) и определенные наборы свойств, которые можно увидеть в инспекторе объектов построителя приложений. Графические знаки на видеокадрах и панелях делятся на две категории: знаки, применяемые для оформления, и знаки, которые используются для отображения состояния технологического оборудования (активные графические знаки). Знаки, используемые для оформления, являются безымянными, т. е. имеют некоторый стандартный для построителя приложений тег. Тег активного графического знака можно выбирать совершенно произвольно, но если тег графического знака совпадает с кодом сигнала в кодировке подсистемы верхнего уровня, состояние которого он отображает, то для этого знака предоставляется дополнительная информация, например, график суточного изменения сигнала.

Во вновь разработанной SCADA-системе вся совокупность сигналов состояния и управления разбивается по технологическим объектам, каждый из которых обладает определенным набором сигналов состояния технологического оборудования и управления технол-

логическим оборудованием. В качестве таких технологических объектов могут выступать, например, различные двигатели привода, конвейеры, насосы водоотлива, ячейки энергоснабжения и т. п.

В конфигурационных файлах подсистемы верхнего уровня указывается общий список всех технологических объектов с указанием их кода в подсистеме верхнего уровня, приводятся таблицы сигналов состояния и управления по каждому технологическому объекту и определяются методы отображения сигналов состояния по каждому видеокадру и каждой панели графического интерфейса оператора. Кодировка сигналов в подсистеме верхнего уровня состоит из кода технологического объекта, которому принадлежит сигнал, с добавлением символа, определяющего тип сигнала, и добавлением десятичного порядкового номера сигнала по таблице соответствующего типа сигналов.

Текстовые конфигурационные файлы подсистемы нижнего уровня определяют последовательность расключения датчиков по системам сопряжения с технологическим оборудованием и, дополнительно, задают кодировку данных состояния и управления в кодах подсистемы верхнего уровня. Для кодирования сигналов состояния и управления в подсистеме нижнего уровня используются комбинации из пяти целых чисел: номер узла технологической сети, номер порта на узле, номер канала на узле, тип сигнала и порядковый номер сигнала по конфигурационным файлам подсистемы нижнего уровня.

Сетевая конфигурация технологической сети и распределение программного обеспечения АСУТП по узлам задаются соответствующими текстовыми конфигурационными файлами. Списки и форматы различных сводок состояния объектов технологического оборудования также определяются своими текстовыми конфигурационными файлами сводок.

Основные особенности SCADA-системы. Все АРМ оператора являются абсолютно равноправными по операциям отображения состояния контролируемого технологического оборудования и управления технологическим оборудованием. Каждый АРМ оператора обладает собственной локальной архивной базой данных, синхронизированной с прочими базами данных. Отсутствие в технологической сети выделенного сервера данных (сервера приложений) является первой главной особенностью программного обеспечения SCADA-системы. Подобный подход реализует многократное горячее резервирование в системах автоматизированного управления и, тем самым, во-первых, существенно увеличивает надежность автоматизации управления технологическими процессами, а во-вторых, существенно упрощает процесс модификации и настройки программного обеспечения.

Рассматриваемая SCADA-система спроектирована и разработана как SCADA-система реального времени и предназначена для автоматизации технологических процессов, накладывающих жесткие требования на время реакции системы управления на то или иное событие. Существует верхняя оценка времени реакции SCADA-системы на любое одиночное событие, и она измеряется десятками миллисекунд. Гарантированное малое время реакции на любое одиночное событие является второй основной особенностью SCADA-системы.

Настройка программного обеспечения SCADA-системы на конкретный состав и конфигурацию автоматизируемого технологического оборудования, а также методы отображения состояния технологического оборудования на графическом интерфейсе оператора задаются текстовыми конфигурационными файлами подсистем верхнего и нижнего уровней. Непосредственно сам графический интерфейс оператора разрабатывается с помощью системного построителя приложений „Application Builder Photon“, что предполагает передачу заказчикам не только исполняемых модулей SCADA-системы подсистемы нижне-

го уровня, но и передачу по крайней мере всей совокупности объектных модулей программного обеспечения подсистемы верхнего уровня. Однажды установленное программное обеспечение SCADA-системы может быть далее свободно скопировано на любой носитель информации. Таким образом, программное обеспечение SCADA-системы является открытым. И это обстоятельство является третьей основной особенностью программного обеспечения SCADA-системы, и это же обстоятельство существенно усложняет проблему защиты программного обеспечения от несанкционированного использования программно-аппаратными средствами. Для решения указанной проблемы предпочтительнее пользоваться правовыми методами, как это принято в большинстве стран Запада.

Заключение. Защита технологической сети АСУТП от кибератак достигается, как обычно, жестким контролем доступа операторов к управлению по категориям, блокированием всех функций обращения к операционной системе со стороны операторов, а также свойствами самой операционной системы „Нейтрин“ и физической связью технологической и административной вычислительных сетей предприятий. При необходимости доступ из технологической сети в административную сеть осуществляется только через дополнительные сетевые адAPTERы с контролем используемых сервисов стека протоколов TCP/IP. Возможные уязвимости программного обеспечения SCADA-системы могут быть достаточно легко найдены и нейтрализованы, поскольку программный код SCADA-системы является открытым.

Список литературы

1. Голушки С. К., Пищик Б. Н., Чейдо Г. П., Шакиров С. Р. Импортозамещение в области аппаратно-программных комплексов как базис для создания высоконадежных АСУ ТП // Тезисы Международной конференции „Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015“. АМСА–2015, Новосибирск, 19–23 октября 2015. С. 113.
2. Макарчев В., Михайленко Ю., Подервянский Р. Осторожно: вирусы! // Военно-политическое обозрение. 2011. [Электрон. рес.]: <http://www.belvpo.com/ru/1159.html>.
3. Грицай Г., Тиморин А., Гольцев Ю., Ильин Р., Гордейчик С., Карпин А. Безопасность промышленных систем в цифрах v2.1. [Электрон. рес.]: http://www.ptsecurity.ru/download/SCADA_analytics_russian.pdf.
4. [Электрон. рес.]: <http://www.kpda.ru/products/kpda10964/>.
5. Благодарный А. И., Карапышева Л. С. Универсальная SCADA-системы „Блакарт“ под управлением операционной системы QNX // Проблемы информатики. 2009. № 3. С. 62–67.
6. Благодарный А. И. Особенности и опыт применения надежной SCADA-системы „Блакарт“ // Тезисы Всероссийской конференции „Индустриальные информационные системы“ ИИС–2013. Новосибирск, 24–28 сентября 2013. С. 10.



Благодарный Анатолий Иванович — научный сотрудник Института вычислительных технологий СО РАН; тел.: +7 (913) 757-13-71; e-mail: ablagodarnyj@mail.ru.

Анатолий Благодарный в 1975 году окончил обучение в Новосибирском государственном университете

по специальности „Механика, прикладная математика“. Стажировался и учился в аспирантуре Института гидродинамики СО РАН. С 1980 года работает в области разработки цифровых систем управления технологическими процессами, опасными по тем или иным критериям.

Является ведущим разработчиком системы диспетчерского контроля и управления магистральными нефтепроводами на территориях

Тюменской области и Ханты-Мансийского автономного округа. Участвовал в автоматизации энергоснабжения Сибирского химического комбината. В настоящее время основным направлением научно-производственной деятельности является автоматизация технологических процессов на угольных шахтах Кузбасса.

Anatoly Blagodarnyj in 1975 graduated from Novosibirsk state University majoring in „Mechanics, applied mathematics“. Trained and studied at the graduate Institute of hydrodynamics SB RAS.

Since 1980 works in the field of development of digital control systems of technological processes hazardous according to various criteria. He is a leading developer of Supervisory control and management of oil trunk pipelines in the territories of Tyumen region and Khanty-Mansiysk Autonomous Area. I participated in automation of power supply of Siberian Chemical Plant. Now the main direction of research and production activity is automation of technological processes on coal mines of Kuzbass.

Дата поступления — 27.02.2018

GOOPHI: A NEW CODE FOR NUMERICAL MODELING OF ASTROPHYSICAL FLOWS ON INTEL XEON PHI SUPERCOMPUTERS

I. M. Kulikov, I. G. Chernykh

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

In this paper, a new hydrodynamics code called gooPhi to simulate astrophysical flows on modern Intel Xeon Phi processors with KNL architecture is presented. In this paper, an astrophysical phenomenon a “jellyfish” galaxy formation was considered. It is known, that the main scenarios of formation these objects are based on the ram-pressure mechanism of intergalactic gas or based on the galactic wind by means active galaxy nuclei. However, the ram-pressure mechanism can be obtained as a result of collision of galaxies with different masses. This scenario was investigated in the present work using the developed code. A new vector numerical method implemented in the form of a program code for massively parallel architectures is proposed. For the numerical solution of hydrodynamic equations, the modification of the original numerical method based on a combination of the operator splitting method, Godunov method and HLL solver was used. This method combines all advantages of the above methods and has a high degree of parallelism. In the base of parallel implementation is a multi-level decomposition of computing. At the first level, geometric decomposition of the computational domain by means MPI library was used. At the second level, there is a decomposition of computing between the Intel Xeon Phi accelerator threads by means OpenMP library. In everyone thread, vectorization of computing is carried out by means of AVX512. It should be noted, that the construction of the numerical method allows all kinds of decomposition. The results of the verification of numerical method on three tests of Godunov and on the Sedov blast wave test are presented. The purpose of the first test is the correctness of the contact discontinuity description. Most methods for solving hydrodynamics equations yield either oscillation or diffusion of shock waves. The author’s method gives the diffusion of the shock wave, while at the same time correctly reproduces the location of the shock wave, contact discontinuity and the waveform of the rarefaction wave. In the second test, a gas with the same thermodynamic parameters expands in different directions, forming a rarified region in the center. The test reveals an ability to physically believable simulate such a situation. It is known from the literature that many methods give an erroneous (unphysical) temperature jump in the region of strong rarefaction, and as a result, the resulting solution is distorted. The author’s method successfully simulates the rarefaction region. The main idea of the third test is to check the stability of the numerical method. A big pressure drop (5 decimal orders) should reveal the ability of the method to stably model strong perturbations with the emergence of rapidly propagating shock waves. The author’s method successfully simulates a strong wave. Sedov blast wave test is a standard test that verifies the ability of a method and its realization to reproduce strong shock waves with large Mach numbers. The author’s numerical method reproduces quite well the position of the shock wave, as well as the density profile. A detailed description is given, and a parallel implementation of the code is made. A performance of 173 gigaflops and 48 speedup are obtained on a single Intel Xeon Phi processor. A 97 per cent scalability is reached with 16 processors. In this paper, we considered the scenario of the formation of galaxies like a “jellyfish” on the basis of the collision of two dwarf galaxies dSph, which differ by an order in mass. We also considered the chemical processes taking place in the tail of galaxies by means of the complete system

of chemical reactions and a shortened version that allow construct an analytical solution. It is worth noting that the asymptotics of these solutions has one nature. Behind the front of a massive galaxy, a tail is formed, in which the development of the Kelvin-Helmholtz instability develops an analog of the turbulent flow, due to which the tail is fragmented into tentacles observed in the “jellyfish” galaxies. For characteristic temperature values, as well as the characteristic concentration of atomic neutral hydrogen in tentacles, the behavior of the concentration of various forms of hydrogen was modeled by means of the ChemPAK code, which in its overwhelming part was ionized and the molecular one was several thousandths percent. It is obvious that the process of formation of molecular hydrogen plays a smaller role than the processes leading to the ionization of hydrogen. In this connection, an analytic solution of the ionization process is of main interest.

Key words: Numerical modeling, computational astrophysics, Intel Xeon Phi.

References

1. Poggianti B. M., Jaffe Y. L., Moretti A., et al. Ram-pressure feeding of supermassive black holes // Nature. 2017. V. 548, I. 7667. P. 304–309.
2. Kulikov I., Chernykh I. Numerical Modeling of “Jellyfish” Galaxy at Intel Xeon Phi supercomputers // IEEE. Ivannikov ISPRAS Open Conference. 2017. P. 104–109.
3. Conor M., Ebeling H., Roediger E. Jellyfish: Observational Properties of Extreme Ram-Pressure Stripping Events in Massive Galaxy Clusters // IAU General Assembly. 2015. Meeting 29, ID 2258213.
4. Sheen Y.-K., Smith R., Jaffe Y., et al. Discovery of Ram-pressure Stripped Gas around an Elliptical Galaxy in Abell 2670 // The Astrophysical Journal Letters. 2017. V. 840. Article Number L7.
5. Roediger E., Bruggen M., Owers M. S., Ebeling H., Sun M. Star formation in shocked cluster spirals and their tails // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 443. P. L114–L118.
6. Rawle T. D., Altieri B., Egami E., et al. Star formation in the massive cluster merger Abell 2744 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 442, I. 1. P. 196–206.
7. Glover S., Mac Low M. Simulating the Formation of Molecular Clouds. I. Slow Formation by Gravitational Collapse from Static Initial Conditions // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2007. V. 169, I. 2. P. 239–268.
8. Godunov S. K. A Difference Scheme for Numerical Solution of Discontinuous Solution of Hydrodynamic Equations // Mathematicesky Sbornik (in russian). 1959. V. 47. P. 271–306.
9. Courant R., Isaacson E., Rees M. On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1952. V. 5. P. 243–256.
10. Roe P. Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference solvers // Journal of Computational Physics. 1997. V. 135. P. 250–258.
11. Engquist B., Osher S. J. One-sided difference approximations for nonlinear conservation laws // Mathematics of Computational. 1981. V. 36, 321–351.
12. Harten A., Lax P. D., Van Leer B. On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws // Society for Industrial and Applied Mathematics. 1983. V. 25. P. 35–61.
13. Einfeld B. On Godunov-type methods for gas dynamics // SIAM Journal of Numerical Analysis. 1988. V. 25. P. 294–318.
14. Batten P., Clarke N., Lambert C., Causon D. M. On the Choice of Wavespeeds for the HLLC Riemann Solver // SIAM Journal of Computing. 1997. V. 18. P. 1553–1570.
15. Van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov’s Method // Journal of Computational Physics. 1979. V. 32. P. 101–136.
16. Jin S., Xin Z. The Relaxation Schemes for Systems of Conservation Laws in Arbitrary Space Dimensions // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1995. V. 48. P. 235–276.

17. Collela P., Woodward P.R. The Piecewise Parabolic Method (PPM) Gas-Dynamical simulations // *Journal of Computational Physics*. 1984. V. 54. P. 174–201.
18. Popov M., Ustyugov S. Piecewise parabolic method on local stencil for gasdynamic simulations // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2007. V. 47, I. 12. P. 1970–1989.
19. Popov M., Ustyugov S. Piecewise parabolic method on a local stencil for ideal magnetohydrodynamics // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2008. V. 48, I. 3. P. 477–499.
20. Kulikov I., Vorobyov E. Using the PPML approach for constructing a low-dissipation, operator-splitting scheme for numerical simulations of hydrodynamic flows // *Journal of Computational Physics*. 2016. V. 317. P. 318–346.
21. Liu X., Osher S., Chan T. Weighted essentially non-oscillatory schemes // *Journal of Computational Physics*. 1994. V. 115. P. 200–212.
22. Gingold R. A., Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics — Theory and application to non-spherical stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1977. V. 181. P. 375–389.
23. Lucy L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis // *The Astrophysical Journal*. 1977. V. 82. P. 1013–1024.
24. Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Hydrodynamical code for numerical simulation of the gas components of colliding galaxies // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2011. V. 194, I. 2. Article Number 47.
25. Kulikov I. GPUPEGAS: A New GPU-accelerated Hydrodynamic Code for Numerical Simulations of Interacting Galaxies // *The Astrophysical Journal Supplements Series*. 2014. V. 214, I. 1. Article Number 12.
26. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Snytnikov A. V., Glinsky 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.
27. Kulikov I., Chernykh I. AstroPhi 2.0: a new code of high order accuracy for hydrodynamic modeling of astrophysical phenomena on hybrid supercomputers by means Intel Xeon Phi accelerators // *The problem of Informatics*. 2015. V. 3. P. 46–70.
28. Kulikov I., Chernykh I., Tutukov A. A New Hydrodynamic Model for Numerical Simulation of Interacting Galaxies on Intel Xeon Phi Supercomputers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 719. Article Number 012006.
29. Glinsky B., Kulikov I., Chernykh I., et al. The Co-design of Astrophysical Code for Massively Parallel Supercomputers // *Lecture Notes in Computer Science*. 2017. V. 10049. P. 342–353.
30. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Glinsky B. M., Protasov V. A. An Efficient Optimization of HLL Method for the Second Generation of Intel Xeon Phi Processor // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2018. V. 39, N. 4. P. 543–550.
31. Glinsky B., Kulikov I., Snytnikov A., Romanenko A., Chernykh I., Vshivkov V. Co-design of parallel numerical methods for plasma physics and astrophysics // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. 2014. V. 1, N. 3. P. 88–98.
32. Glover S., Mac Low M.-M. Simulating the Formation of Molecular Clouds. I. Slow Formation by Gravitational Collapse from Static Initial Conditions // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2007. V. 169. P. 239–268.
33. Kulikov I., Chernykh I., Protasov V. Mathematical modeling of formation, evolution and interaction of galaxies in cosmological context // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 722. Article Number 012023.
34. Kulikov I., Chernykh I., Tutukov A. A New Hydrodynamic Model for Numerical Simulation of Interacting Galaxies on Intel Xeon Phi Supercomputers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 719. Article Number 012006.

35. Sutherland R., Dopita M. Cooling functions for low-density astrophysical plasmas // The Astrophysical Journal Supplement Series. 1993. V. 88. P. 253–327.
36. Abel T., Anninos P., Zhang Y., Norman M. Modeling primordial gas in numerical cosmology // New Astronomy. 1997. V. 2, I. 3. P. 181–207.
37. Anninos P., Zhang Y., Abel T., Norman M. Cosmological Hydrodynamics with Multi-Species Chemistry and Nonequilibrium Ionization and Cooling // New Astronomy. 1997. V. 2, I. 3. P. 209–224.
38. Grassi T., Bovino S., Schleicher D., Prieto J., Seifried D., Simoncini E., Gianturco F. KROME — a package to embed chemistry in astrophysical simulations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 439, I. 3. P. 2386–2419.
39. Chernykh I., Stoyanovskaya O., Zasyapkina O. ChemPAK Software Package as an Environment for Kinetics Scheme Evaluation // Chemical Product and Process Modeling. 2009. V. 4, I. 4. Article Number 3.
40. Rusanov V. V. The calculation of the interaction of non-stationary shock waves with barriers // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1961. V. 1. P. 267–279.
41. Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Computational methods for ill-posed problems of gravitational gasdynamics // Journal of Inverse and Ill-posed Problems. 2011. V. 19, I. 1. P. 151–166.
42. Godunov S., Kulikov I. Computation of Discontinuous Solutions of Fluid Dynamics Equations with Entropy Nondecrease Guarantee // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2014. V. 54, I. 6. P. 1012–1024.
43. Frigo M., Johnson S. The Design and Implementation of FFTW3 // Proceedings of the IEEE. 2005. V. 93, I. 2. P. 216–231.
44. Kalinkin A., Laevsky Y., Gololobov S. 2D Fast Poisson Solver for High-Performance Computing // Lecture Notes in Computer Science. 2009. V. 5698. P. 112–120.



ГООРНІ: НОВЫЙ КОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА СУПЕРЭВМ, ОСНАЩЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯМИ INTEL XEON PHI

И. М. Куликов, И. Г. Черных

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 519.6, 524.3

В статье изложен новый гидродинамический код gooPhi для моделирования астрофизических течений с использованием новейших ускорителей Intel Xeon Phi с архитектурой KNL. В рамках статьи мы рассмотрим астрофизическое явление: галактику типа медуза. Известно, что основные сценарии образования таких объектов основаны на механизме набегающего давления межгалактического газа или галактического ветра, создаваемого активным ядром галактики. Однако, механизм набегающего давления может быть получен в результате столкновения галактик различной массы. Такой сценарий и был исследован в настоящей работе с помощью разработанного кода. Подробно описан новый векторный численный метод, реализованный в виде программного кода для массивно-параллельных архитектур. Для решения гидродинамических уравнений используется модификация оригинального численного метода, основанного на комбинации метода разделения операторов, метода Годунова и HLL схемы. Такой метод объединяет все достоинства перечисленных методов и обладает высокой степенью параллелизации. В основе параллельной реализации лежит многоуровневая декомпозиция вычислений. На первом уровне используется геометрическая декомпозиция расчетной области с помощью библиотеки MPI. На втором уровне происходит декомпозиция вычислений между потоками ускорителя Intel Xeon Phi с помощью библиотеки OpenMP. В рамках каждого потока происходит векторизация вычислений средствами AVX512. Стоит отметить, что конструкция численного метода допускает все виды декомпозиции вычислений. Приведены результаты верификации численного метода на трех тестах Годунова и на задаче Седова о точечном взрыве. Целью первого теста является определение правильности описания контактного разрыва. Большинство методов решения газодинамических уравнений дает либо осцилляцию, либо диффузию (“размазывание” ударных волн). Авторский метод дает размазывание ударной волны, в то же время корректно воспроизводит местоположение ударной волны, контактного разрыва и формы волны разрежения. В ходе второго теста, газ с одинаковыми термодинамическими параметрами разлетается в разные стороны, образуя в центре существенную область разрежения. Тест выявляет способность физически правдоподобно моделировать такую ситуацию. Из литературы известно, что многие методы дают ошибочный (нефизический) рост температуры в области сильного разрежения, и, как следствие, получаемое решение искажается. Авторский метод успешно моделирует область разрежения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 18-11-00044), построение аналитических решений выполнено в рамках бюджетной тематики ИВМ и МГ СО РАН 0315-2016-0009.

Основная задача третьего теста — проверка устойчивости численного метода. Огромный перепад давления (5 десятичных порядков) должен выявить способность метода устойчиво моделировать сильные возмущения с возникновением быстро распространяющихся ударных волн. Авторский метод успешно моделирует сильный разрыв. Задача Седова о точечном взрыве является стандартным тестом, проверяющим способность метода и его реализации воспроизводить сильные ударные волны с большими числами Маха. Авторский численный метод достаточно хорошо воспроизводит положение ударной волны, а также профиль плотности. Подробно описаны детали и исследование параллельной реализации кода. В рамках одного Intel Xeon Phi получена производительность 173 ГигаФлопс и 48-кратное ускорение, при использовании 16 ускорителей получена 97-процентная масштабируемость. В работе мы рассмотрели сценарий образования галактик типа медуза на основе столкновения двух карликовых галактик dSph, отличающихся на порядок по массе. Также мы рассмотрели химические процессы, происходящие в хвосте галактик с помощью полной системы химических реакций, и сокращенный вариант, допускающие аналитическое решение. Стоит отметить, что асимптотики этих решений имеют одну природу. За фронтом массивной галактики образуется хвост, в котором за счет развития неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца развивается аналог турбулентного течения, за счет которого хвост фрагментируется на тентакли, наблюдаемые в галактиках типа медузы. Для характерных значений температуры, а также характерной концентрации атомарного нейтрального водорода в тентаклях с помощью пакета ChemPAK было смоделировано поведение концентрации различных форм водорода, который в подавляющей своей части ионизировался, а молекулярный составлял несколько тысячных процента. Очевидно, что процесс образования молекулярного водорода играет меньшую роль, чем процессы, приводящие к ионизации водорода. В связи с этим особый интерес представляет собой аналитическое решение процесса ионизации.

Ключевые слова: математическое моделирование, вычислительная астрофизика, Intel Xeon Phi.

Введение. Предметом современной астрофизики является исследование физических процессов во Вселенной, их влияние на самоорганизацию и эволюцию астрономических объектов, а также на дальнейшую их динамику и взаимодействие. В основе описания астрономических объектов лежат гидродинамические процессы. Именно гидродинамика определяет характер астрофизических течений, которые приводят к эволюции астрономических объектов. Существенность учета гравитационного и магнитного полей, а также сложность воспроизведения условий космоса в лабораторных условиях накладывают значительные ограничения на экспериментальное изучение астрономических объектов. Таким образом, математическое моделирование — это основной, а часто и единственный, подход к теоретическому исследованию астрофизических течений.

В последнее время большой интерес вызывают галактики типа медуза, например галактика ESO 137-001. Основной механизм образования подобных галактик — механизм набегающего давления (в зарубежной литературе — ram-pressure) относительно плотного межгалактического газа на галактику, в результате чего она теряет звезды, газ и пыль в виде тентаклей. Альтернативный сценарий образования механизма изложен в работе [1], где высказывается гипотеза о механизме, основанном на эволюции активного ядра галактики. Однако, по нашему мнению, сценарии не ограничены этими двумя и возникновение механизма возможно при столкновении галактик различных масс [2], что в целом соответствует выводам доклада на Генеральной Ассамблее Международного астрономического союза в 2015 году [3] в космологическом контексте. В настоящей работе мы рассмотрим

модельную задачу столкновения двух карликовых сфероидальных галактик (dSph) с соотношением масс 1:10. Проведен ряд исследований химического состава тентаклей в виде ионизированного и молекулярного водорода [4]. Отдельный интерес тентакли представляют с точки зрения процесса звездообразования [5, 6]. Таким образом, в статье будет изложена первичная проверка гипотезы об образовании галактик типа медуза на основе сценария столкновения двух dSph галактик с соотношением масс 1:10 с учетом химо-кинетики основных форм водорода [7]. Для проверки настоящей гипотезы необходимо проведение полномасштабного гидродинамического моделирования.

За последние 60 лет разработан ряд численных методов решения гидродинамических уравнений, изучены их свойства (точность, сходимость, устойчивость) и области их применения. Начиная с метода Годунова [8], основанного на точном решении задачи Римана, началось развитие численных методов решения гидродинамических уравнений. Использование различных способов линеаризации задачи Римана дало класс методов: Куранта — Изаксона — Риса [9], Roe [10], Ошера [11], метода HLL [12], HLLE [13] и HLLC [14]. Также на основе метода Годунова были сделаны реализации высокого порядка — монотонная противопотоковая схема второго порядка точности MUSCL [15] и TVD схемы [16], третьего порядка кусочно-параболический метод PPM [17] и его модификация для компактного шаблона вычислений [18–20], неосциллирующие схемы с весами WENO [21]. Альтернативным подходом к сеточным методам является метод сглаженных частиц SPH [22–23], который используется, но менее активно чем ранее, для задач астрофизики (см. обзоры кодов в работах [24–25]).

В 2015 году нами был разработан код AstroPhi [26–27], в его основе была реализация оригинального численного метода с использованием offload модели программирования Intel Xeon Phi. Используемая архитектура ускорителей также не позволила нам реализовать векторные инструкции, в то же время переход на native режим позволил нам получить производительность кода в размере 28 ГигаФлопс [28]. Использование низкоуровневой векторизации циклов в коде AstroPhi позволило получить прирост производительности до величины порядка 100 ГигаФлопс [29]. Стало понятно, что необходимо использовать низкоуровневые средства векторизации для достижения максимальной производительности, что и было реализовано в новой версии кода на основе HLL метода и при использовании одного ускорителя [30]. В этой реализации удалось достичь 245 ГигаФлопс производительности на Intel Xeon Phi 7250 и 302 ГигаФлопс на Intel Xeon Phi 7290. Ограничения HLL метода и однопроцессорный вариант программы побудили нас к созданию нового параллельного кода gooPhi на основе оригинального численного метода, допускающего векторизацию вычислений. Второй раздел статьи посвящен описанию численной модели и конструированию численного метода. В третьем разделе приведены детали параллельной реализации. Четвертый раздел посвящен верификации метода на стандартных гидродинамических тестах. В пятом разделе описаны вычислительные эксперименты по изучению сценария образования галактик типа медуза на основе столкновения двух dSph галактик. В шестом разделе сформулировано заключение по статье.

1. Описание численной модели. 1.1. Уравнения гравитационной газовой динамики.

В основе математической модели лежат уравнения многокомпонентной гравитационной гидродинамики. Важным условием для последующего конструирования векторизованного численного метода является запись уравнений в векторном виде. Это соответствует концепции со-дизайна, который был сформулирован авторами настоящей статьи ранее [31]. Будем использовать переопределенную систему уравнений гидродинамики с уравне-

нием энтропии. Такая запись позволяет записать систему гидродинамических уравнений в дивергентной форме, что позволяет сформулировать векторный численный метод. Во введении было сказано, что, помимо самой формы тентаклей, особый интерес представляют процессы образования молекулярного H_2 и ионизированного H^+ водорода. Для них и атомарного водорода H запишем уравнения неразрывности.

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho_H \\ \rho_{H_2} \\ \rho_{H^+} \\ \rho \vec{u} \\ \rho S \\ \rho E \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} \rho_H \vec{u} \\ \rho_{H_2} \vec{u} \\ \rho_{H^+} \vec{u} \\ \rho \vec{u} \otimes \vec{u} + p \\ \rho S \vec{u} \\ (\rho E + p) \vec{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_H \\ s_{H_2} \\ s_{H^+} \\ \rho \nabla \Phi \\ (\gamma - 1) \rho^{1-\gamma} (\Lambda - \Gamma) \\ \Lambda - \Gamma \end{pmatrix} \quad (1)$$

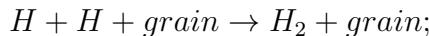
где ρ_{H,H_2,H^+} — плотность атомарного, молекулярного и ионизированного водорода соответственно, $\rho = \rho_H + \rho_{H_2} + \rho_{H^+}$ — плотность газовой смеси, $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ — вектор скорости, S — энтропия, $p = S \rho^\gamma$ — давление, γ — показатель адиабаты, $\rho E = \rho \varepsilon + \frac{1}{2} \rho \vec{u}^2$ — полная механическая энергия, $p = (\gamma - 1) \rho \varepsilon$ — уравнение состояния, s_{H,H_2,H^+} — скорость образования соответствующей формы водорода, Φ — гравитационный потенциал, удовлетворяющий уравнению Пуассона:

$$\Delta \Phi = 4\pi G \rho, \quad (2)$$

где G — гравитационная постоянная, Λ — функция охлаждения, Γ — функция нагревания.

1.2. *Химические процессы.* Мы будем рассматривать основные химические реакции, изложенные в работе [32], скорости химических реакций, а также функции охлаждения/-нагревания, взятые из работ [33–38]. Приведем список химических и ядерных реакций:

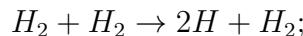
— Образование молекулярного водорода [34]:



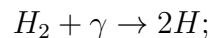
— Первая столкновительная диссоциация молекулярного водорода [33]:



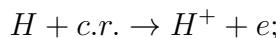
— Вторая столкновительная диссоциация молекулярного водорода [34]:



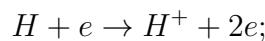
— Фотодиссоциация молекулярного водорода [34]:



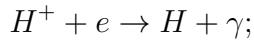
— Ионизация космическими лучами [32]:



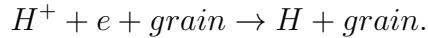
— Столкновительная ионизация [36]:



— Рекомбинация излучением [33].



— Рекомбинация на пыли [32]:



В математической модели будет использоваться эффективный показатель адиабаты в виде:

$$\gamma = \frac{5n_H + 5n_e + 7n_{H_2}}{3n_H + 3n_e + 5n_{H_2}}.$$

В моделировании мы также будем использовать равновесную химию, полученную с помощью кода ChemPAK [39] или аналитические решения при использовании основных реакций образования молекулярного и ионизированного водорода.

1.3. Численный метод решения уравнений гидродинамики. Для решения гидродинамических уравнений была использована модификация оригинального численного метода, основанного на комбинации метода разделения операторов, метода Годунова и HLL схемы. Такой метод объединяет все достоинства перечисленных методов и обладает высокой степенью параллелизации, на чем остановимся подробнее в следующих разделах.

Для дискретизации введем в трехмерной области решения равномерную прямоугольную сетку с ячейками $x_i = i \times h_x$, $i = 1,..,I_{max}$, $y_k = k \times h_y$, $k = 1,..,K_{max}$, $z_l = l \times h_z$, $l = 1,..,L_{max}$, где h_x , h_y , h_z — шаги сетки, I_{max} , K_{max} , L_{max} — количество узлов сетки по направлениям x , y , z : $h_x = x_{max}/I_{max}$, $h_y = y_{max}/K_{max}$, $h_z = z_{max}/L_{max}$. Для простоты изложения будем считать, что $h_x = h_y = h_z = h$, шаг по времени τ вычисляется из условия Куранта

$$\frac{\tau \times (c + \|\vec{u}\|)}{h} = CFL < 1,$$

где CFL — число Куранта, $c = \sqrt{\gamma p/\rho}$ — скорость звука. Также напомним, что уравнения гидродинамики (1) записаны в векторной форме:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot f(\mathbf{v}) = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{v} — вектор консервативных переменных. Для уравнения (3) численная схема по одному направлению записывается в виде:

$$\frac{\mathbf{v}_i^{n+1} - \mathbf{v}_i^n}{\tau} + \frac{F_{i+1/2} - F_{i-1/2}}{h} = 0, \quad (4)$$

где F — решение задачи Римана. Далее изложим идею векторного численного метода.

Для демонстрации базовой идеи метода рассмотрим скалярное уравнение (3), записанное в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\partial f(\mathbf{v})}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

на границе двух ячеек (L — левая ячейка и R — правая ячейка) мы можем линеаризовать уравнение (5) и записать в виде:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + a \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} = 0$$

где $a = const$ — скорость распространения решения или в общем случае матрица Якоби, также имеет место соотношение $f = a \times v$. Для определенности будем считать скорость $a > 0$, в противном случае имеет место схема вывода, дающая тот же результат. В этом случае последнее уравнение можно записать в виде двух сопряженных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \left(\mathbf{v} + \frac{f}{a} \right) + a \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{v} + \frac{f}{a} \right) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\mathbf{v} - \frac{f}{a} \right) - a \frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{v} - \frac{f}{a} \right) &= 0.\end{aligned}$$

В этом случае на разрыве имеют место соотношения:

$$\mathbf{v}_L + \frac{f_L}{a} = V + \frac{F}{a}; \quad \mathbf{v}_R - \frac{f_R}{a} = V - \frac{F}{a},$$

интересующая нас функция потока на границе F записывается следующим уравнением:

$$F = \frac{f_L + f_R}{2} + \frac{a}{2} (\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_R)$$

При отрицательном значении a вывод аналогичен и итоговая формула для определения задачи Римана может быть записана в виде:

$$F = \frac{f(\mathbf{v}_L) + f(\mathbf{v}_R)}{2} + \frac{\|a\|}{2} (\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_R). \quad (6)$$

В случае использования векторных уравнений в качестве константы рассматривается максимальное собственное число.

В оригинальном численном методе решение уравнений мы разбивали на два этапа — работу сил (эйлеров этап) и адвективный перенос (лагранжев этап). На эйлеровом этапе уравнения имели две характеристики $\pm c$, на лагранжевом этапе — модуль скорости. В связи с этим уравнение для решения задачи Римана можно рассмотреть как последовательность двух решений по двум этапам (в случае использования консервативных переменных — независимых решений), тогда финальная запись уравнения для определения потока в задаче Римана имеет вид:

$$F = \frac{f(\mathbf{v}_L) + f(\mathbf{v}_R)}{2} + \frac{c + \|\vec{u}\|}{2} (\mathbf{v}_L - \mathbf{v}_R). \quad (7)$$

Очевидно, что схема (4) с определением потока (7) естественным образом векторизуется. Отметим также, что схема по своей структуре аналогична схеме Русанова, однако, в отличие от схемы Русанова [40], которая позиционируется как некоторое упрощение HLL метода, в оригинальном подходе используется явное выделение каждого из этапов и точное выполнение условия сопряжения численного решения на разрывах на каждом из этапов.

Отметим, что функции охлаждения/нагревания, также как и химическая кинетика, реализуются простейшей явной схемой решения ОДУ.

1.4. Регуляризация численного решения. На завершающем этапе решения гидродинамических уравнений происходит корректировка решения. В случае границы газ-вакуум с использованием формулы [41]:

$$|\vec{u}| = \sqrt{2(E - \epsilon)}, (E - \vec{u}^2/2)/E \geq 10^{-3}$$

в остальной области происходит корректировка, которая гарантирует неубывание энтропии [42]:

$$|\rho\epsilon| = \left(\rho E - \frac{\rho \vec{u}^2}{2} \right), (E - \vec{u}^2/2)/E < 10^{-3}$$

Такая модификация обеспечивает детальный баланс энергий и гарантирует неубывание энтропии.

1.5. Численный метод решения уравнения Пуассона. После решения гидродинамических уравнений необходимо восстановить гравитационный потенциал по плотности газовой смеси. Для решения уравнения Пуассона используем метод, основанный на быстром преобразовании Фурье. Для этого используем 27-точечный шаблон для аппроксимации уравнения Пуассона:

$$\begin{aligned} & -\frac{38}{9}\Phi_{i,k,l} + \frac{4}{9}(\Phi_{i-1,k,l} + \Phi_{i+1,k,l} + \Phi_{i,k-1,l} + \Phi_{i,k+1,l} + \Phi_{i,k,l-1} + \Phi_{i,k,l+1}) + \\ & \frac{1}{9}(\Phi_{i-1,k-1,l} + \Phi_{i+1,k-1,l} + \Phi_{i-1,k+1,l} + \Phi_{i+1,k+1,l} + \Phi_{i-1,k,l-1} + \Phi_{i+1,k,l-1} + \\ & \Phi_{i-1,k,l+1} + \Phi_{i+1,k,l+1} + \Phi_{i,k-1,l-1} + \Phi_{i,k+1,l-1} + \Phi_{i,k-1,l+1} + \Phi_{i,k+1,l+1}) + \\ & \frac{1}{36}(\Phi_{i-1,k-1,l-1} + \Phi_{i-1,k+1,l-1} + \Phi_{i-1,k-1,l+1} + \Phi_{i-1,k+1,l+1} + \Phi_{i+1,k-1,l-1} + \Phi_{i+1,k+1,l-1} + \\ & \Phi_{i+1,k-1,l+1} + \Phi_{i+1,k+1,l+1}) = 4\pi G h^2 (\rho_{i,k,l} + n_{i,k,l}) \end{aligned}$$

Это связано с обеспечением максимальной инвариантности решения относительно поворота. Алгоритм решения уравнения Пуассона будет состоять из нескольких этапов.

Этап 1. Постановка граничных условий для уравнения Пуассона. Для постановки граничных условий для гравитационного потенциала на границе области D будем использовать первые члены мультипольного разложения — статический, осевой и центробежный моменты инерции:

$$\Phi(x,y,z)|_D = -\frac{M}{r} - \frac{M}{r^3}(I_x + I_y + I_z - 3I_0)$$

где

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{(x^2 I_x + y^2 I_y + z^2 I_z) - 2(xy I_x y + xz I_x z + yz I_y z)}{r^2} \\ I_x &= \sum_j (z_j^2 + y_j^2) m_j \quad I_y = \sum_j (x_j^2 + z_j^2) m_j \quad I_z = \sum_j (x_j^2 + y_j^2) m_j \\ I_{xy} &= \sum_j x_j y_j m_j \quad I_{xz} = \sum_j x_j z_j m_j \quad I_{yz} = \sum_j y_j z_j m_j \end{aligned}$$

где x, y, z — координаты центра ячеек на границе области, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ — расстояние до центра области, x_j, y_j, z_j — координата очередной ячейки, m_j — масса очередной ячейки, M — масса всей области. Когда значения потенциала на границе области определены, то они подставляются в 27-точечный шаблон для определения итоговой плотности $\rho_{i,k,l}$ на границе D .

Этап 2. Преобразование плотности в пространство гармоник. Итоговая плотность представляется в виде суперпозиции по собственным функциям оператора Лапласса:

$$\rho_{i,k,l} = \sum_{jmn} \sigma_{jmn} \exp \left(\frac{\vec{i}\pi ij}{I} + \frac{\vec{i}\pi km}{K} + \frac{\vec{i}\pi ln}{L} \right)$$

где I, K, L — число ячеек по каждой координате, \vec{i} — мнимая единица. Для этого используется быстрое преобразование Фурье.

Этап 3. Решение уравнения Пуассона в пространстве гармоник. Мы предполагаем, что потенциал также представлен в виде суперпозиции по собственным функциям оператора Лапласса:

$$\Phi_{i,k,l} = \sum_{jmn} \phi_{jmn} \exp \left(\frac{\vec{i}\pi ij}{I} + \frac{\vec{i}\pi km}{K} + \frac{\vec{i}\pi ln}{L} \right)$$

При подстановке такого разложения в схему аппроксимации уравнения Пуассона мы получаем достаточно простую формулу для вычисления амплитуд гармоник потенциала:

$$\phi_{jmn} = \frac{\frac{2}{3}\pi h^2 \sigma_{jmn}}{1 - \left(1 - \frac{2\sin^2 \frac{\pi j}{I}}{3}\right) \left(1 - \frac{2\sin^2 \frac{\pi m}{K}}{3}\right) \left(1 - \frac{2\sin^2 \frac{\pi n}{L}}{3}\right)}$$

После чего необходимо проделать обратное быстрое преобразование Фурье гармоник потенциала в функциональное пространство гармоник. Для решения уравнения Пуассона, в основе которого быстрое преобразование Фурье для суперЭВМ с распределенной памятью, была использована библиотека FFTW [43], которая, несмотря на использование коллективных взаимодействий, функционирует достаточно быстро, чтобы не замедлить время счета относительно решения уравнений гидродинамики [44].

2. Параллельная реализация. В основе параллельной реализации лежит многоуровневая декомпозиция вычислений:

- одномерная декомпозиция расчетной области средствами MPI, которая для согласованности с решением уравнения Пуассона задается библиотекой FFTW,
- одномерная декомпозиция вычислений средствами OpenMP в рамках одного процесса, выполняющегося на одном ускорителе Intel Xeon Phi,
- векторизация вычислений в рамках одной ячейки.

Перейдем к более подробному описанию организации и исследования параллельной реализации.

2.1. *Геометрическая декомпозиция вычислений.* Геометрическая декомпозиция расчетной области осуществляется средствами MPI по процессам и средствами OpenMP по потокам. В случае декомпозиции вычислений средствами MPI необходимо учесть перекрывающиеся подобласти. Компактный шаблон вычислений позволяет использовать только один слой перекрытия. Графическое представление геометрической декомпозиции расчетной области представлено на рис. 1.

Как уже было сказано, декомпозиция вычислений осуществляется средствами библиотеки FFTW с использованием следующего кода:

```
// Создание плана прямого и обратного БПФ
fftwnd_mpi_plan plan = fftw3d_mpi_create_plan(
MPI_COMM_WORLD, NX, NY, NZ, FFTW_FORWARD, FFTW_ESTIMATE);
fftwnd_mpi_plan iplan = fftw3d_mpi_create_plan(
```

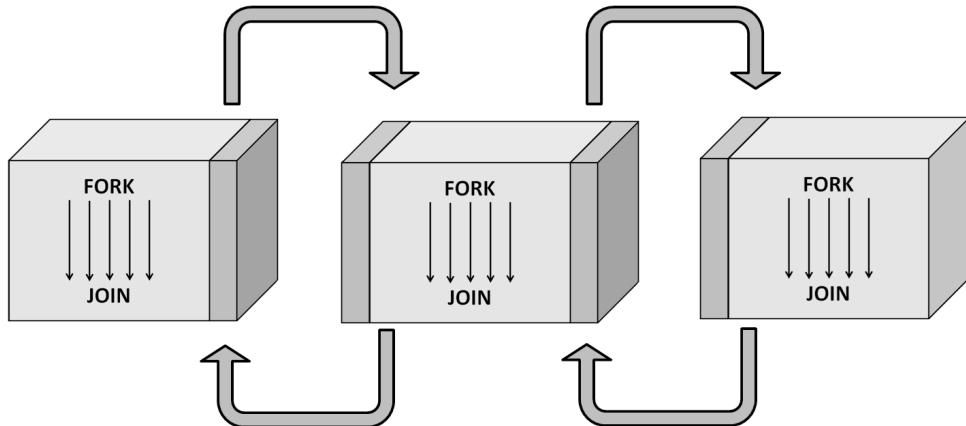


Рис. 1. Геометрическая декомпозиция вычислений средствами MPI и OpenMP

```
MPI_COMM_WORLD, NX, NY, NZ, FFTW_BACKWARD, FFTW_ESTIMATE);
```

```
// Определение размера подобласти
fftwnd_mpi_local_sizes(plan ,
&local_nx, // размер по оси X
&local_x_start, // стартовый индекс по оси X
&local_ny_after_transpose, // размер и индекс по оси Y
&local_y_start_after_transpose, // после транспонирования
&total_local_size); // общее количество ячеек в подобласти

// Выделение памяти с учетом выравнивания данных по 64 байтам
U = (double *)_mm_malloc(NX*NY*NZ*NHYDRO*sizeof(double), 64);

// Распределение вычислений средствами OpenMP
#pragma omp parallel for default(none) shared(\dots) \
private(\dots) num_threads(MIC_NUM_THREADS) schedule(dynamic)
for (i=0;i<NX; i++)
\dots
```

Организация межпроцессного взаимодействия приведено в приложении, также как и реализация решения уравнения Пуассона.

2.2. Использование векторных инструкций. В этом подразделе мы опишем основные инструкции, которые были использованы для реализации метода, остановимся только на декларативном описании.

— **_mm512_set1_pd** — формирование вектора, все элементы которого содержат одно скалярное значение.

- **_mm512_load_pd** — загрузка из адреса 8 элементов типа double в вектор.
- **_mm512_mul_pd** — произведение векторов.
- **_mm512_add_pd** — сложение векторов.
- **_mm512_sub_pd** — вычитание векторов.
- **_mm512_stream_pd** — запись вектора в память.

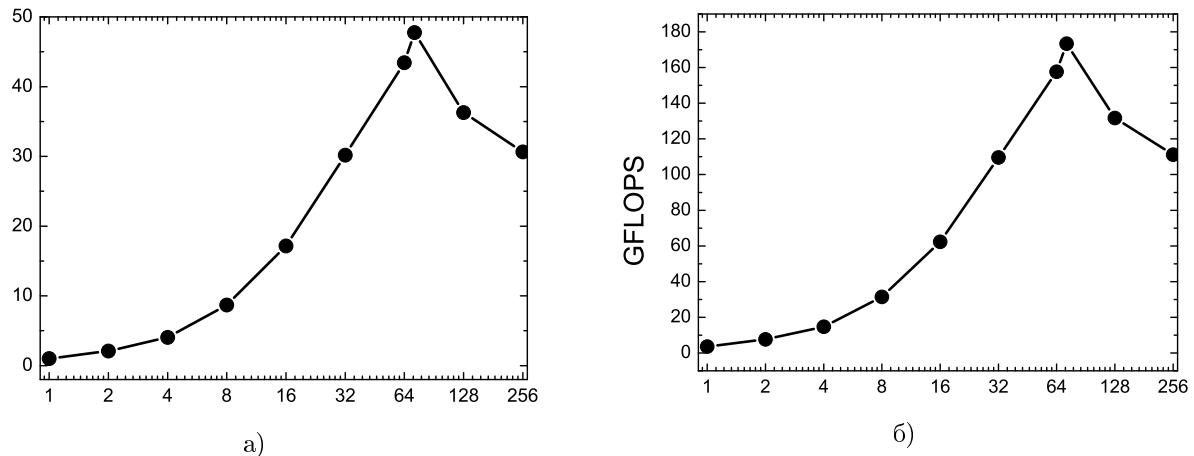


Рис. 2. Ускорение (а) и реальная производительность (б) кода gooPhi в рамках одного Intel Xeon Phi

Приведенных здесь инструкций достаточно для реализации численного метода решения уравнений гидродинамики. Для компиляции кода использовалась следующая строка:

`icc -xMIC-AVX512 -fopenmp -O3 -no-prec-div -o gooPhi.mic gooPhi.cpp -lm`

Здесь стоит отметить только ускорение операции деления с помощью опции `-no-prec-div`. Такая опция является рекомендуемой при использовании SSE расширений.

2.3. Исследование ускорения кода. Проводилось исследование ускорения кода gooPhi на сетке 512^3 , для этого замерялось время численного метода (Total), в секундах, при различном числе используемых логических ядер (Threads). Ускорение P (Speed-Up) вычислялось по формуле 8:

$$P = \frac{\text{Total}_1}{\text{Total}_K} \quad (8)$$

где Total_1 — время вычислений на одном логическом ядре, Total_K — время вычислений при использовании K логических ядер. Также была сделана оценка реальной производительности. Результаты исследований ускорения и производительности на сетке 512^3 приведены на рис. 2.

В рамках одного Intel Xeon Phi получены производительность 173 ГигаФлопс и 48-кратное ускорение.

2.4. Исследование масштабируемости кода. Проводилось исследование масштабируемости кода gooPhi на расчетной сетке $512p \times 512 \times 512$ при использовании всех логических ядер на каждый ускоритель, где p — число используемых ускорителей. Таким образом, на каждый ускоритель приходится размер подобласти 512^3 . Для исследования масштабируемости замерялось время численного метода (Total), в секундах, при различном числе используемых ускорителей Intel Xeon Phi (KNL). Масштабируемость T (Scalability) вычислялась по формуле

$$T = \frac{\text{Total}_1}{\text{Total}_p} \quad (9)$$

где Total_1 — время вычислений на одном ускорителе при использовании одного ускорителя, Total_p — время вычислений на одном ускорителе при использовании p ускорителей. Результаты исследований ускорения приведены на рис. 3.

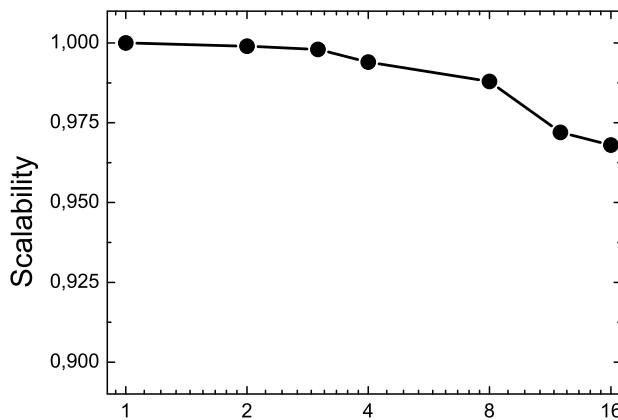


Рис. 3. Масштабируемость кода gooPhi при различном числе ускорителей Intel Xeon Phi

Таблица 1

Начальное состояния для задач об ударной трубе

N	ρ_L	v_L	p_L	ρ_R	v_R	p_R	x_0	t
1	2	0	2,0	1	0	1,00	0,5	0,200
2	1	-2	0,4	1	2	0,40	0,5	0,150
3	1	0	1000,0	1	0	0,01	0,5	0,012

Таким образом, при использовании 16 ускорителей получена 97-процентная масштабируемость, что является достаточно высоким результатом.

3. Верификация численного метода. 3.1. *Тесты Годунова.* Начальная конфигурация для трех задач — тестов Годунова, приведена в таблице (1), где x_0 — начальная позиция разделителя между двумя соседними состояниями (L — левое, R — правое). Для вычислительных экспериментов использовалось 200 расчетных ячеек.

Перейдем к результатам вычислительных экспериментов.

Целью первого теста является определение правильности описания контактного разрыва. Большинство методов решения газодинамических уравнений дают либо осцилляцию, либо диффузию (“размазывание” ударных волн). Авторский метод дает размазывание ударной волны, в то же время корректно воспроизводит местоположение ударной волны, контактного разрыва и формы волны разрежения (см. рис. 4).

В ходе второго теста, газ с одинаковыми термодинамическими параметрами разлетается в разные стороны, образуя в центре существенную область разрежения. Тест выявляет способность физически правдоподобно моделировать такую ситуацию. Из литературы известно, что многие методы дают ошибочный (нефизический) рост температуры в области сильного разрежения и, как следствие, получаемое решение искажается. Авторский метод успешно моделирует область разрежения (см. рис. 5).

Основная задача третьего теста — проверка устойчивости численного метода. Огромный перепад давления (5 десятичных порядков) должен выявить способность метода

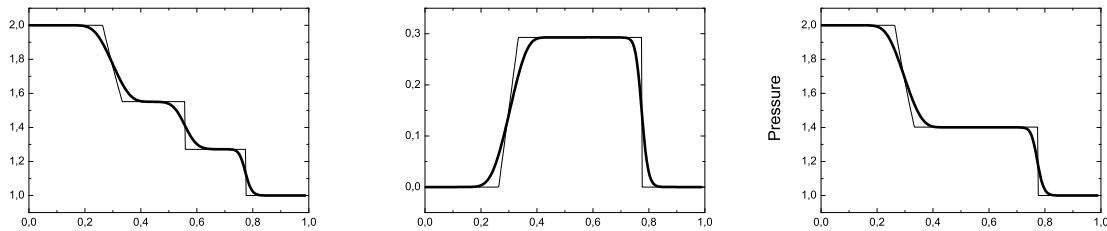


Рис. 4. Результаты для первой задачи об ударной трубе

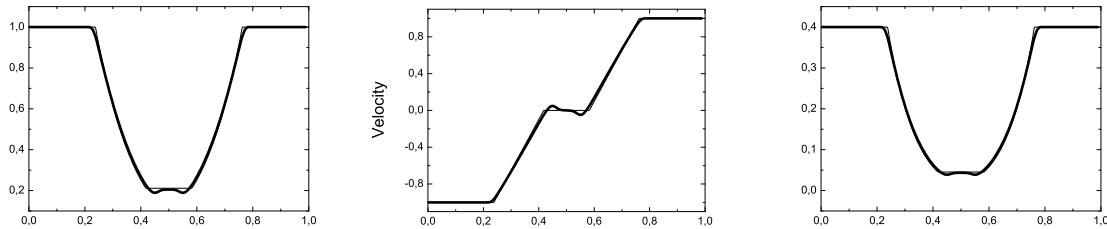


Рис. 5. Результаты для второй задачи об ударной трубе

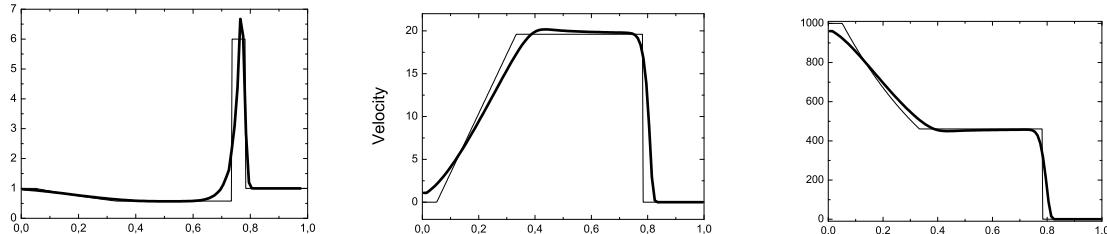


Рис. 6. Результаты для третьей задачи об ударной трубе

устойчиво моделировать сильные возмущения с возникновением быстро распространяющихся ударных волн. Авторский метод успешно моделирует сильный разрыв (см. рис. 6).

3.2. Задача Седова о точечном взрыве. Задача Седова о точечном взрыве в астрофизике формулируется как задача о взрыве сверхновой. Для моделирования задачи о точечном взрыве будем рассматривать область $[-0,5; 0,5]^3$, показатель адиабаты $\gamma = 5/3$, начальную плотность в области $\rho_0 = 1$ и начальное давление $p_0 = 10^{-5}$. В момент времени $t = 0$ выделяется внутренняя энергия $E_0 = 0,6$. Область взрыва ограничена радиусом $r_{central} = 0,02$. Для вычислительного эксперимента использовалась расчетная сетка 100^3 . Смоделированный профиль плотности и момента импульса на момент времени $t = 0,05$ изображен на рис. 7).

Задача Седова о точечном взрыве является стандартным тестом, проверяющим способность метода и его реализации воспроизводить сильные ударные волны с большими числами Маха. Скорость звука фоновой среды пренебрежимо мала, поэтому число Маха

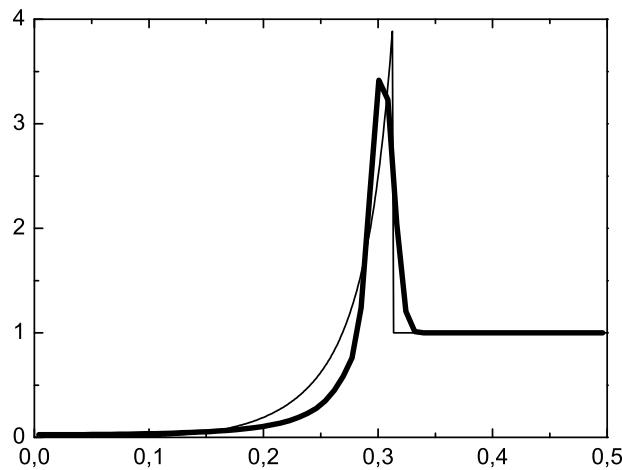


Рис. 7. Плотность, полученная при численном решении задачи Седова о точечном взрыве. Сплошной линией изображено точное решение

достигает значения $M = 1432$. Авторский численный метод достаточно хорошо воспроизводит положение ударной волны, а также профиль плотности.

4. Моделирование сценария образования галактики типа медузы на основе столкновения галактик. В этом разделе мы рассмотрим сценарий образования галактик типа медузы на основе столкновения двух карликовых галактик dSph, отличающихся на порядок по массе. Также мы рассмотрим химические процессы, происходящие в хвосте галактик с помощью полной системы химических реакций, приведенных во втором разделе, и сокращенный вариант, допускающие аналитическое решение. Стоит отметить, что асимптотики этих решений имеют одну природу.

4.1. Постановка задачи. Будем моделировать центральное столкновение двух галактик с массами $M_1 = 10^9 M_\odot$ и $M_2 = 10^8 M_\odot$, имеющие скорости $v_{cr} = 40$ км/с, линейный размер галактик составляет $L = 3$ килопарсек, каждая из которых задана двумя самогравитирующими сферическими облаками с NFW-профилями. Галактики врачаются в противоположенные стороны с дифференциальным вращением:

$$v_\phi = \sqrt{r \frac{\partial \Phi}{\partial r}}$$

Будем рассматривать эволюцию в течение 270 миллионов лет. Начальное расстояние между галактиками совпадает с их линейным размером.

4.2. Результаты вычислительных экспериментов. Результаты вычислительных экспериментов приведены на рис. 8.

За фронтом массивной галактики образуется хвост, в котором за счет развития неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца развивается аналог турбулентного течения, за счет которого хвост фрагментируется на тентакли, наблюдаемые в галактиках типа медузы.

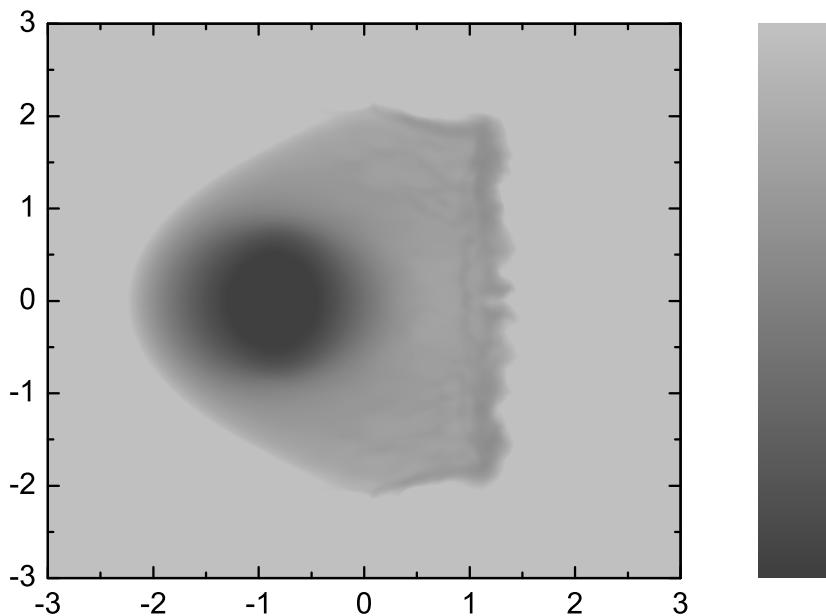
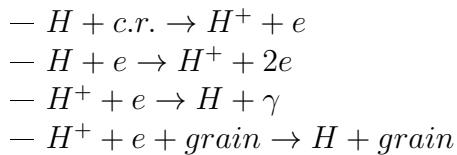


Рис. 8. Результаты вычислительных экспериментов по воспроизведению сценария образования галактики типа медузы на основе столкновения галактик различной массы. На рисунках приведена плотность в см^{-3} на момент времени 270 миллионов лет.

4.3. Химическая кинетика водорода. Для характерных значений температуры $T = 1000$ К и $T = 5000$ К, а также характерной концентрации атомарного нейтрального водорода в тентаклях с помощью пакета ChemPAK [39] было смоделировано поведение концентрации различных форм водорода, который в подавляющей своей части ионизировался, а молекулярный составлял несколько тысячных процента. В интервале времени $10^{11} < t < 10^{11.5}$ секунд происходит резкий процесс ионизации. Очевидно, что процесс образования молекулярного водорода играет меньшую роль, чем процессы, приводящие к ионизации водорода. В связи с этим особый интерес представляет собой аналитическое решение процесса ионизации на основе следующих реакций:



В дальнейших публикациях мы рассмотрим этот вопрос более подробно.

Заключение. В статье изложен новый гидродинамический код gooPhi для моделирования астрофизических течений с использованием новейших ускорителей Intel Xeon Phi с архитектурой KNL. Подробно описан новый векторный численный метод, реализованный в виде программного кода для массивно-параллельных архитектур. Приведены результаты верификации численного метода. Подробно описаны детали и исследование параллельной реализации кода. В рамках одного Intel Xeon Phi получена производительность

173 ГигаФлопс и 48-кратное ускорение, при использовании 16 ускорителей получена 97-процентная масштабируемость.

Приложение 1. Межпроцессорные взаимодействия

Pattern for MPI communications

```
#define COMM MPI_COMM_WORLD
#define STATUS MPI_STATUS_IGNORE
#define TR 1 // \glqq{} to right\grqq{} communications
#define TL 2 // \glqq{} to left\grqq{} communications
\ dots
if (rank == 0)
{
    buffer[0] = a[N-2];
    MPI_Send( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank+1,
              TR,COMM);
    MPI_Recv( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank+1,
              TL,COMM,STATUS );
    a[N-1] = buffer[0];
}

if (rank == size-1)
{
    MPI_Recv( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank-1,
              TR,COMM,STATUS );
    a[0] = buffer[0];
    buffer[0] = a[1];
    MPI_Send( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank-1,
              TL,COMM);
}

if (rank!=0 && rank!=size-1)
{
    MPI_Recv( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank-1,
              TR,COMM,STATUS );
    a[0] = buffer[0];
    buffer[0] = a[N-2];
    MPI_Send( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank+1,
              TR,COMM);
    MPI_Recv( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank+1,
              TL,COMM,STATUS );
    a[N-1] = buffer[0];
    buffer[0] = a[1];
    MPI_Send( buffer ,1 ,MPI_DOUBLE, rank-1,
              TL,COMM);
}
```

Приложение 2. Использование библиотеки FFTW

Шаблон решения уравнения Пуассона

```

/* Подготовка правой части уравнения Пуассона (data) */
/* Постановка граничных условий (data) */

// Прямое БПФ
fftwnd_mpi(plan, 1, data, NULL, FFTW_TRANSPOSED_ORDER);
/* Решение уравнения Пуассона в пространстве гармоник */

// Обратное БПФ
fftwnd_mpi(iplan, 1, data, NULL, FFTW_TRANSPOSED_ORDER);

```

Список литературы

1. Poggianti B. M., Jaffe Y. L., Moretti A., et al. Ram-pressure feeding of supermassive black holes // Nature. 2017. V. 548, I. 7667. P. 304–309.
2. Kulikov I., Chernykh I. Numerical Modeling of “Jellyfish” Galaxy at Intel Xeon Phi supercomputers // IEEE. Ivannikov ISPRAS Open Conference. 2017. P. 104–109.
3. Conor M., Ebeling H., Roediger E. Jellyfish: Observational Properties of Extreme Ram-Pressure Stripping Events in Massive Galaxy Clusters // IAU General Assembly. 2015. Meeting 29, ID 2258213.
4. Sheen Y.-K., Smith R., Jaffe Y., et al. Discovery of Ram-pressure Stripped Gas around an Elliptical Galaxy in Abell 2670 // The Astrophysical Journal Letters. 2017. V. 840. Article Number L7.
5. Roediger E., Bruggen M., Owers M. S., Ebeling H., Sun M. Star formation in shocked cluster spirals and their tails // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 443. P. L114–L118.
6. Rawle T. D., Altieri B., Egami E., et al. Star formation in the massive cluster merger Abell 2744 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 442, I. 1. P. 196–206.
7. Glover S., Mac Low M. Simulating the Formation of Molecular Clouds. I. Slow Formation by Gravitational Collapse from Static Initial Conditions // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2007. V. 169, I. 2. P. 239–268.
8. Godunov S. K. A Difference Scheme for Numerical Solution of Discontinuous Solution of Hydrodynamic Equations // Mathematicesky Sbornik (in russian). 1959. V. 47. P. 271–306.
9. Courant R., Isaacson E., Rees M. On the solution of nonlinear hyperbolic differential equations by finite differences // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1952. V. 5. P. 243–256.
10. Roe P. Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference solvers // Journal of Computational Physics. 1997. V. 135. P. 250–258.
11. Engquist B., Osher S. J. One-sided difference approximations for nonlinear conservation laws // Mathematics of Computational. 1981. V. 36, 321–351.
12. Harten A., Lax P. D., Van Leer B. On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws // Society for Industrial and Applied Mathematics. 1983. V. 25. P. 35–61.
13. Einfeld B. On Godunov-type methods for gas dynamics // SIAM Journal of Numerical Analysis. 1988. V. 25. P. 294–318.
14. Batten P., Clarke N., Lambert C., Causon D. M. On the Choice of Wavespeeds for the HLLC Riemann Solver // SIAM Journal of Computing. 1997. V. 18. P. 1553–1570.
15. Van Leer B. Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V. A Second Order Sequel to Godunov’s Method // Journal of Computational Physics. 1979. V. 32. P. 101–136.

16. Jin S., Xin Z. The Relaxation Schemes for Systems of Conservation Laws in Arbitrary Space Dimensions // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1995. V. 48. P. 235–276.
17. Collela P., Woodward P.R. The Piecewise Parabolic Method (PPM) Gas-Dynamical simulations // Journal of Computational Physics. 1984. V. 54. P. 174–201.
18. Popov M., Ustyugov S. Piecewise parabolic method on local stencil for gasdynamic simulations // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2007. V. 47, I. 12. P. 1970–1989.
19. Popov M., Ustyugov S. Piecewise parabolic method on a local stencil for ideal magnetohydrodynamics // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2008. V. 48, I. 3. P. 477–499.
20. Kulikov I., Vorobyov E. Using the PPML approach for constructing a low-dissipation, operator-splitting scheme for numerical simulations of hydrodynamic flows // Journal of Computational Physics. 2016. V. 317. P. 318–346.
21. Liu X., Osher S., Chan T. Weighted essentially non-oscillatory schemes // Journal of Computational Physics. 1994. V. 115. P. 200–212.
22. Gingold R. A., Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics — Theory and application to non-spherical stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1977. V. 181. P. 375–389.
23. Lucy L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis // The Astrophysical Journal. 1977. V. 82. P. 1013–1024.
24. Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Hydrodynamical code for numerical simulation of the gas components of colliding galaxies // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2011. V. 194, I. 2. Article Number 47.
25. Kulikov I. GPUPEGAS: A New GPU-accelerated Hydrodynamic Code for Numerical Simulations of Interacting Galaxies // The Astrophysical Journal Supplements Series. 2014. V. 214, I. 1. Article Number 12.
26. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Snytnikov A. V., Glinsky 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.
27. Куликов И. М., Черных И. Г. AstroPhi 2.0: новый код высокого порядка точности для гидродинамического моделирования астрофизических течений на гибридных суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi // Проблемы информатики. 2015. № 3. С. 46–70.
28. Kulikov I., Chernykh I., Tutukov A. A New Hydrodynamic Model for Numerical Simulation of Interacting Galaxies on Intel Xeon Phi Supercomputers // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 719. Article Number 012006.
29. Glinsky B., Kulikov I., Chernykh I., et al. The Co-design of Astrophysical Code for Massively Parallel Supercomputers // Lecture Notes in Computer Science. 2017. V. 10049. P. 342–353.
30. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Glinsky B. M., Protasov V. A. An Efficient Optimization of HLL Method for the Second Generation of Intel Xeon Phi Processor // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2018. V. 39, N. 4. P. 543–550.
31. Glinsky B., Kulikov I., Snytnikov A., Romanenko A., Chernykh I., Vshivkov V. Co-design of parallel numerical methods for plasma physics and astrophysics // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2014. V. 1, N. 3. P. 88–98.
32. Glover S., Mac Low M.-M. Simulating the Formation of Molecular Clouds. I. Slow Formation by Gravitational Collapse from Static Initial Conditions // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2007. V. 169. P. 239–268.
33. Kulikov I., Chernykh I., Protasov V. Mathematical modeling of formation, evolution and interaction of galaxies in cosmological context // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 722. Article Number 012023.

34. Kulikov I., Chernykh I., Tutukov A. A New Hydrodynamic Model for Numerical Simulation of Interacting Galaxies on Intel Xeon Phi Supercomputers // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 719. Article Number 012006.
35. Sutherland R., Dopita M. Cooling functions for low-density astrophysical plasmas // The Astrophysical Journal Supplement Series. 1993. V. 88. P. 253–327.
36. Abel T., Anninos P., Zhang Y., Norman M. Modeling primordial gas in numerical cosmology // New Astronomy. 1997. V. 2, I. 3. P. 181–207.
37. Anninos P., Zhang Y., Abel T., Norman M. Cosmological Hydrodynamics with Multi-Species Chemistry and Nonequilibrium Ionization and Cooling // New Astronomy. 1997. V. 2, I. 3. P. 209–224.
38. Grassi T., Bovino S., Schleicher D., Prieto J., Seifried D., Simoncini E., Gianturco F. KROME — a package to embed chemistry in astrophysical simulations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 439, I. 3. P. 2386–2419.
39. Chernykh I., Stoyanovskaya O., Zasyapkina O. ChemPAK Software Package as an Environment for Kinetics Scheme Evaluation // Chemical Product and Process Modeling. 2009. V. 4, I. 4. Article Number 3.
40. Rusanov V. V. The calculation of the interaction of non-stationary shock waves with barriers // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1961. V. 1. P. 267–279.
41. Vshivkov V., Lazareva G., Snytnikov A., Kulikov I., Tutukov A. Computational methods for ill-posed problems of gravitational gasodynamics // Journal of Inverse and Ill-posed Problems. 2011. V. 19, I. 1. P. 151–166.
42. Godunov S., Kulikov I. Computation of Discontinuous Solutions of Fluid Dynamics Equations with Entropy Nondecrease Guarantee // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2014. V. 54, I. 6. P. 1012–1024.
43. Frigo M., Johnson S. The Design and Implementation of FFTW3 // Proceedings of the IEEE. 2005. V. 93, I. 2. P. 216–231.
44. Kalinkin A., Laevsky Y., Gololobov S. 2D Fast Poisson Solver for High-Performance Computing // Lecture Notes in Computer Science. 2009. V. 5698. P. 112–120.



Куликов Игорь Михайлович — д-р физ.-мат. наук, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, старший научный сотрудник лаборатории суперкомпьютерного моделирования, e-mail: kulikov@ssd.sscc.ru, тел.: +7 (383) 330-96-65.

В 2007 году с отличием закончил ФПМИ НГТУ. В 2010 защитил кандидатскую диссертацию, а в 2017 докторскую диссертацию по специальности 05.13.18 — „Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ“.

В ИВМ и МГ СО РАН работает с 2010 года в лаборатории параллельных алгоритмов решения больших задач, с 2018 года в лаборатории суперкомпьютерного моделирования. Автор более 30 рейтинговых публикаций в области вычислительной гидродинамики, вычисли-

тельной астрофизики и высокопроизводительных вычислений. Автор четырех свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Igor Kulikov — Senior Research Fellow of the Supercomputing Laboratory ICMMG SB RAS. Tel: +7 383 330 9665.

In 2007 he graduated with honors from the Novosibirsk State Technical University. In 2010 he defended his PHD thesis, and in 2017 his doctoral thesis on specialty 05.13.18 — mathematical modeling, numerical methods and program complexes. In IVMMG SB RAS has been working since 2010 in the laboratory of parallel algorithms for solving large problems, since 2018 in the laboratory of supercomputer modeling. Author of more than 30 rating publications in the field of computational fluid dynamics, computational astrophysics and high-performance computing. Author of four certificates on registration of computer programs.



Черных Игорь Геннадьевич — канд. физ.-мат. наук, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории суперкомпьютерного моделирования, e-mail: chernykh@parbz.sccc.ru, тел.: +7 (383) 330-61-49.

В 2002 году окончил ФИТ НГУ, в 2006 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.11 — „Математическое обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей“ и продолжил работать в ИВМ и МГ СО РАН.

С 2011 года работает в ЦКП „Сибирский Суперкомпьютерный Центр“. В 2017 году возглавил лабораторию Суперкомпьютерного Моделирования, в состав которой вошел ЦКП ССКЦ. Имеет более 30 рейтинговых публикаций в области решения прикладных задач с использованием суперкомпьютерного моделирования. Область профессиональных интересов включает в себя высокопроизводительные вычисления, астрофизику, астрохимию, химическую кинетику.

Igor Chernykh — Leading Researcher of the ICMMG SB RAS, Head of the Supercomputing

Laboratory ICMMG SB RAS. Tel: +7 383 330 6149.

Author of more than 30 rating publications in the field of HPC, chemical kinetics, astrophysics. Educational Degrees: Ph.D. in Computer Science, December, 2006, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science (ICMMG SB RAS).

Title: ChemPAK: code for numerical simulation of direct chemical kinetics problems using supercomputers. Work conducted at: Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science. Scientific advisor: Prof. V. A. Vshivkov. Diploma in Computer Science, June 2002, Novosibirsk State University, Russia.

Title: Development of CORBA-client for distributed visualization system in geophysics. Work conducted at: Novosibirsk State University. Scientific Advisor: A. I. Kulikov. Research Interests: High Performance Computing (HPC), Co-Design, Code optimization techniques for many core processors, Hardware, HPC in Astrophysics, HPC in Chemical Engineering, Numerical simulation and HPC.

Дата поступления — 26.04.2018

Правила представления и подготовки рукописей для публикации в журнале „ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ“

Общие требования.

Редакция принимает к рассмотрению статьи в электронном виде (*исходный файл в LATEX* и файл PDF, либо MS Word с приложением оригиналами рисунков в формате тех программ, в которых они были сделаны, отдельными файлами).

Файлы, содержащие текст статьи, иллюстрации и дополнительные материалы, можно пересыпать на электронный адрес редакции: problem-info@sscc.ru.

Принимаются файлы, архивированные архиваторами ZIP/7Z или RAR; применение самораспаковывающихся архивов не допускается.

При повторной отправке материалов, а также при внесении в исходный текст дополнений или исправлений необходимо сообщить об этом в редакцию в тексте электронного письма.

Текст статьи с формулами, рисунками, таблицами должен быть подготовлен на стандартном листе формата А4 через 1,5 интервала, размер шрифта 12 pt, все поля по 2 см.

Статьи, содержащие формулы, следует набирать в редакторе LATEX. В остальных случаях допускается использование программы MSWord, шрифт — TimesNewRoman; автоматическая расстановка переносов в документе должна быть отключена.

Направляя статью в редакцию журнала, автор (соавторы) на безвозмездной основе передает(ют) изда-телю на срок действия авторского права по действующему законодательству РФ исключительное право на использование статьи или отдельной ее части (в случае принятия редколлегией Журнала статьи к опубликованию) на территории всех государств, где авторские права в силу международных договоров Российской Федерации являются охраняемыми, в том числе следующие права: на воспроизведение, на распространение, на публичный показ, на доведение до всеобщего сведения, на перевод на иностранные языки и переработку (и исключительное право на использование переведенного и (или) переработанного произведения вышеуказанными способами), на предоставление всех вышеперечисленных прав другим лицам.

Журнал „Проблемы информатики“ является некоммерческим изданием. Плата с авторов за публикацию статей не взимается.

К статье должны быть приложены:

— разрешение на публикацию от экспертного совета организации, в которой выполнена работа (для авторов из России);

— оригинал рецензии;

портретные фотографии авторов разрешением не менее 300 dpi.

— Блоки информации и на русском, и на английском языках просьба присыпать отдельными файлами:

— Название статьи;

— Инициалы и фамилии авторов;

— Места работы авторов: полное наименование организации, почтовый индекс, город, страна;

— Код(ы) классификации УДК;

— Аннотации, содержащие краткую постановку задачи и описание метода решения: на русском языке объемом не более 1000 знаков, на английском языке расширенную, объемом от 4000 до 8000 знаков, что соответствует требованиям ВАК и Scopus.

— Ключевые слова;

— Списки используемой литературы в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5—2008 (в английской версии необходимо выполнить транслитерацию неанглоязычных элементов списка литературы в соответствии с ГОСТ Р 7.0.34-2014) — составляются по ходу упоминания источников в тексте;

— Краткие биографии (БИО) авторов с указанием ключевых научных достижений (включая учченую степень, ученое звание — при наличии; основные области научных интересов и формулировку основных результатов, место работы, занимаемую должность, контактные данные — почтовый адрес с индексом, адрес электронной почты, контактный телефон).

Подготовка статьи.

1. **Материал** статьи должен быть изложен в следующей последовательности:

1. название статьи на английском языке;
2. инициалы и фамилия автора(ов) на английском языке;
3. место работы автора(ов) (на английском языке): полное наименование организации, индекс, город, страна;
4. англоязычная аннотация;

5. ключевые слова на английском языке;
6. references+транслитерация неанглоязычных элементов списка литературы;
7. название статьи на русском языке;
8. инициалы и фамилии и авторов;
9. место работы авторов: полное наименование организации, почтовый индекс, город, страна;
10. индекс УДК;
11. аннотация на русском языке;
12. ключевые слова (не более 8);
13. текст статьи;
14. список литературы, оформленный в соответствии с требованиями ГОСТ;
15. краткие биографии авторов на английском и русском языках с указанием ключевых научных достижений (ученую степень, ученое звание — при наличии; место работы, занимаемую должность, контактные данные — почтовый адрес с индексом, адрес электронной почты, контактный телефон, основные области научных интересов и формулировка основных результатов).

2. Требования к формулам:

- Нумерация формул сквозная, выносные формулы центрируются, номер выровнен по правому краю.

3. Требования к рисункам:

- Файлы с рисунками присылаются отдельно в формате программ, в которых они были выполнены: в формате MS Excel (для графиков и диаграмм), eps, pdf, png, tiff, bmp или jpg (с максимальным качеством).

- Рисунки с подрисуточными подписями заверстываются в текст статьи.

- Тексты, являющиеся частью рисунка, выполняются шрифтом TimesNewRoman.

- Фотографии должны иметь разрешение не менее 300 dpi.

4. Дополнительные требования:

- В текст статьи необходимо включать ссылки на рисунки и таблицы, а также подрисуточные подписи и заголовки таблиц. Все буквенные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснить в основном тексте или в подрисуточных подписях.

- Сокращения слов не допускаются (кроме общепринятых).

- Векторные переменные обозначаются полужирным шрифтом без курсива.

- Таблицы не должны быть громоздкими. Значения физических величин в таблицах, на графиках и в тексте должны указываться в единицах измерения СИ.

- Графики, если их на рисунке несколько, а также отдельные детали на чертежах, узлы и линии на схемах следует обозначать цифрами, набранными курсивом.

- Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые имеются ссылки в тексте, нумерация сквозная.

- Ссылки на источники в тексте заключаются в квадратные скобки.

- Иностранные источники приводятся на языке оригинала. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Все статьи, опубликованные в журнале „Проблемы информатики“, доступны на сайте https://elibrary.ru/title_about.asp?id=30275 и на сайте журнала <http://problem-info.sscru> спустя год после опубликования.

Пример оформления статей можно посмотреть на сайте журнала <http://problem-info.sscru>.