



ISSN 2078-8975

Выпуск / Issue
№ 4 (52) Т. 2 / 2012

ВЕСТНИК BULLETIN

КЕМЕРОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
OF KEMEROVO STATE UNIVERSITY

МАТЕМАТИКА
ФИЗИКА
ХИМИЯ

ВЕСТНИК КЕМЕРОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал теоретических и прикладных исследований
Издается с 1999 г.

2012 № 4 (52) Т. 2

Журнал включен в «Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук Высшей аттестационной комиссии

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Волчек В. А., д-р ист. наук, проф., ректор КемГУ (г. Кемерово, Россия) – председатель совета.
Аникин А. Е. – д-р филол. наук, чл.-корр. РАН, Институт филологии РАН (г. Новосибирск, Россия).
Афанасьев К. Е. – д-р физ.-мат. наук, проф., проректор по информатизации КемГУ (г. Кемерово, Россия).
Бабищ М. – д-р юр. наук, проф. Баня-Лукского университета (г. Баня Лука, Сербия).
Дружинин В. Г., д-р биол. наук, проф., проректор по научной работе КемГУ (г. Кемерово, Россия).
Захаров Ю. А. – д-р хим. наук, проф., чл.-корр. РАН, зав. кафедрой химии твердого тела КемГУ (г. Кемерово, Россия).
Конторович А. Э. – д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, председатель Президиума Кемеровского научного центра СО РАН (г. Новосибирск, Россия).
Кремер Р. – д-р, проф. Потсдамского университета, главный редактор журнала «Weltrends» (г. Потсдам, Германия).
Лаврик О. И. – д-р хим. наук, чл.-корр. РАН, Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (г. Новосибирск, Россия).
Милошевич Х. – проф. природно-математического факультета Сербского университета (г. Косовска Митровица, Сербия).
Молодин В. И. – д-р истор. наук, академик РАН, Институт археологии и этнографии СО РАН (г. Новосибирск, Россия).
Пихица П. В. – д-р филол. наук, Сеульский национальный университет (г. Сеул, Южная Корея).
Суслов В. И. – д-р экон. наук, чл.-корр. РАН, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (г. Новосибирск, Россия).
Чистякова С. Н. – д-р пед. наук, чл.-корр. РАО, академик-секретарь РАО (г. Москва, Россия).
Шокин Ю. И. – д-р физ.-мат. наук, академик РАН, Институт вычислительных технологий СО РАН (г. Новосибирск, Россия).
Юревич А. В. – д-р психол. наук, чл.-корр. РАН, Институт психологии РАН (г. Москва, Россия).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев К. Е. – д-р физ.-мат. наук, проф., главный редактор, председатель.
Араева Л. А. – д-р филол. наук, проф.
Бибило В. Н. – д-р юр. наук, проф. (Беларусь).
Бобров В. В. – д-р ист. наук, проф.
Данилов Н. Н. – д-р физ.-мат. наук, проф.
Желтов В. В. – д-р филос. наук, проф.
Зеленин А. А. – д-р полит. наук, проф.
Казин Э. М. – д-р биол. наук, проф.
Касаткина Н. Э. – д-р пед. наук, проф.
Лушников Г. И. – д-р филол. наук, доцент.
Мороз А. А. – д-р хим. наук, проф.
Невзоров Б. П. – д-р пед. наук, проф., отв. редактор.
Поплавной А. С. – д-р физ.-мат. наук, проф.
Соколова Я. – канд. филол. наук, проф. (Словакия).
Черненко Т. Г. – д-р юр. наук, проф.
Шабашев В. А. – д-р экон. наук, проф.
Шадрин А. В. – д-р техн. наук, проф.
Щенников В. П. – д-р филос. наук, проф.
Яницкий М. С. – д-р психол. наук, проф.

Редактор выпуска – Л. М. Борискина
Компьютерная верстка – В. А. Шерина

BULLETIN OF KEMEROVO STATE UNIVERSITY

Journal of theoretical and applied research
Founded in 1999

2012 № 4 (52) T. 2

The Bulletin is included into the "List of leading peer-reviewed journals and issues" which should publish main research results of Doctor's and Candidate's theses by the Higher Attestation Commission

FOUNDER:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Kemerovo State University

EDITORIAL ADVISORY BOARD:

V. A. Volchek – Dr. of History, Prof., Rector of Kemerovo State University (Kemerovo, Russia) – Chair.
A. E. Anikin, Dr. of Philology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Philology of the Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk, Russia).
K. E. Afanasyev, Dr. of Physics and Mathematics, Vice-Rector for Informatization of Kemerovo State University (Kemerovo, Russia).
M. Babic, Dr. of Law, Prof. at Banja Luka University (Banja Luka, Serbia).
V. G. Druzhinin – Dr. of Biology, Vice-Rector for Science of Kemerovo State University (Kemerovo, Russia).
Yu. A. Zakharov, Dr. of Chemistry, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Chemistry of Solids of Kemerovo State University (Kemerovo, Russia).
Al. E. Kontorovich, Dr. of Geography and Mineralogy, Academician of the Russian Academy of Sciences, Chairman of the Presidium of Kemerovo Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk, Kemerovo, Russia).
R. Kraemer, Dr., Prof. at Potsdam University, Editor-in-Chief of WeltTrends Journal (Potsdam, Germany).
O. I. Lavrik, Dr. of Chemistry, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine of the Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk, Russia).
H. Milosevic, Prof. at the Faculty of Science and Mathematics of the University in Pristina, President of Impex Company (Kosovska Mitrovica, Serbia).
V. I. Molodin, Dr. of History, Institute of Archeology and Ethnography of the Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk, Russia).
P. V. Pikhitsa, Ph.D., senior researcher at Seoul National University (Seoul, South Korea).
V. I. Suslov, Dr. of Economics, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, Institute of Economics and Industrial Engineering of the Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk, Russia).
S. N. Chistyakova, Dr. of Pedagogic, Corresponding Member of the Russian Academy of Education, Academic Secretary of the RAE (Moscow, Russia).
Yu. I. Shokin, Dr. of Physics and Mathematics, Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk, Russia).
A. V. Yurevich, Dr. of Psychology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Psychology of the RAS (Moscow, Russia).

EDITORIAL BOARD:

K. E. Afanasyev – Dr. of Physics and Mathematics, Prof., Editor-in-Chief – Chair.
L. A. Araeva – Dr. of Philology, Prof.
V. N. Bibilo – Dr. of Law, Prof. (Belarus).
V. V. Bobrov – Dr. of History, Prof.
N. N. Danilov – Dr. of Physics and Mathematics, Prof.
V. V. Zheltov – Dr. of Philosophy, Prof.
A. A. Zelenin – Dr. of Political Science, Prof.
E. M. Kazin – Dr. of Biology, Prof.
N. E. Kasatkina – Dr. of Pedagogic, Prof.
G. I. Lushnikova – Dr. of Philology, Associate Prof.
A. A. Moroz – Dr. of Chemistry, Prof.
B. P. Nevzorov – Dr. of Pedagogic, Prof., Executive Editor.
A. S. Poplavnoy – Dr. of Physics and Mathematics, Prof.
Ya. Sokolova – Candidate of Philology, Prof. (Nitra, Slovakia).
T. G. Chernenko – Dr. of Law, Prof.
V. A. Shabashev – Dr. of Economics, Prof.
A. V. Shadrin – Dr. of Technical Science, Prof.
V. P. Shchennikov – Dr. of Philosophy, Prof.
M. S. Yanitskiy – Dr. of Psychology, Prof.

Issue editor – *L. M. Boriskina*
Computer layout – *V. A. Sherina*

Журнал издается по решению редакционно-издательского совета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет».

Выходит 1 раз в квартал

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации:
ПН ФС77-40023 от 04.06.2010 г.

Адрес редакции:

650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6, к. 1212.
Тел.: (3842) 58-13-01
Факс: (3842) 58-38-85
E-mail: vestnik@kemsu.ru
Адрес сайта:
http://www.kemsu.ru/kemsu_info/science/bulletin.htm

Адрес издателя:

650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6.
Тел.: 8(3842) 58-28-39
Факс: 8(3842) 58-12-26
E-mail: rector@kemsu.ru

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 42150
Каталог российской прессы «Почта России» – 51944

Журнал представлен в открытом доступе на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки и включен в реферативную базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

<http://elibrary.ru>

Ни одна из частей журнала либо издание в целом не могут быть перепечатаны без письменного разрешения авторов или издателя.

Printed by the decision of Scientific Editorial Publishing Council of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Kemerovo State University

Issued once a quarter

The Journal is registered in the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)

Certificate of registration:
ПН ФС77-40023 of 04.06.2010

Editorial Office Address:

650043, Kemerovo, 6 Krasnaya St., room 1212.
Tel.: 8 (3842) 58-13-01
Fax: 8 (3842) 58-38-85
E-mail: vestnik@kemsu.ru
Web-site:
<http://www.kemsu.ru/science/bulletin.htm.en>

Publisher Address:

650043, Kemerovo, 6 Krasnaya St.
Tel.: (3842) 58-28-39
Fax: (3842) 58-12-26
E-mail: rector@kemsu.ru

Subscription indices:

42150 – in the United catalogue “The Press of Russia”
51944 – in the Catalogue of the Russian press “The Post of Russia”

Free access to the Bulletin is provided at the website of the Russian Universal Scientific Electronic Library. The Bulletin is included into the database of the "Russian Science Citation Index".

<http://elibrary.ru>

No part of the Journal can be republished without the permission of the authors or the publisher.

СОДЕРЖАНИЕ/ CONTENTS

МАТЕМАТИКА

- 6 **Байгонакова Г. А., Соколова Д. Ю.** О площади трапеции в сферической геометрии
- 10 **Быков А. А., Счастливцев Е. Л., Пушкин С. Г.** Влияние изменчивости распределений метеорологических параметров и дисперсного состава выбросов в атмосферу на модельные оценки осаждения промышленной пыли
- 17 **Быков А. А., Захаров М. Ю., Счастливцев Е. Л.** Об одном методе восстановления параметров выбросов в атмосферу от пылящего неорганизованного источника
- 22 **Бычков И. В., Опарин Г. А., Новопашин А. П., Сидоров И. А., Горский С. А.** Методы и средства организации параллельных и распределенных вычислений на основе парадигмы модульного программирования
- 30 **Бычков И. В., Ружников Г. М., Хмельнов А. Е., Фёдоров Р. К., Гаченко А. С., Шигаров А. О., Парамонов В. В.** Формирование компонентов инфраструктуры пространственных данных для управления территориальным развитием
- 37 **Гавриленко Т. В., Адмаев О. В.** Оценка экологической безопасности атмосферного воздуха на основе решения уравнений Колмогорова
- 43 **Григорюк А. П., Брагинская Л. П.** Информационная система для комплексной поддержки научных исследований в области активной сейсмологии
- 49 **Гуммель Е. Э., Захаров Ю. Н.** Нестационарная задача протекания в разветвлённых каналах
- 54 **Добрецов Н. Н., Зольников И. Д., Глушкова Н. В., Лямина В. А., Соколов К. С., Макунина Н. И., Смирнов В. В., Пчельников Д. В.** Технологии компьютерного картографирования, гис-анализа и моделирования природно-антропогенных экосистем на примере Новосибирского Академгородка
- 61 **Захаров Ю. Н., Зеленский Е. Е., Родина М. С.** Математическое моделирование работы подземного газификатора по методу потока
- 68 **Ивушкин А. А., Шипунов М. В., Грачев В. В., Мышляев Л. П.** Комбинированное имитационное моделирование – основа решения задач разработки автоматизированных комплексов
- 75 **Карташов В. Я., Бехтгольд И. В.** Применение многочастотного квантования в цифровых системах мониторинга и управления
- 83 **Комарова М. В.** Размерности пространств дифференциалов Прима с переменным дивизором
- 89 **Молородов Ю. И., Миньков В. С.** Информационно-вычислительная система для анализа влияния загрязнения окружающей среды на биологические объекты

MATHEMATICS

- 6 **Baigonakova G. A., Sokolova D. Yu.** On the area of a trapezoid in spherical geometry
- 10 **Bykov A. A., Shastlivtsev E. L., Pushkin S. G.** The influence of variability of meteorological data frequency and air emissions particle size distributions on model estimates of industrial dust deposition
- 17 **Bykov A. A., Zakharov M. Y., Schastlivsev E. L.** A method for reconstruction of a fugitive source's atmospheric dust emission parameters
- 22 **Bychkov I. V., Oparin G. A., Novopashin A. P., Sidorov I. A., Gorskiy S. A.** Methods and tools for parallel and distributed computing based on modular programming paradigm
- 30 **Bychkov I. V., Ruzhnikov G. M., Hmelnov A. E., Fedorov R. K., Gachenko A. S., Shigarov A. O., Paramonov V. V.** Developing components of spatial data infrastructure for the regional development
- 37 **Gavrilenko T. V., Admaev O. V.** Estimation of atmospheric air ecological safety on basis of Kolmogorov equations solution
- 43 **Grigoriuk A. P., Braginskaya L. P.** The informational system for complex support of scientific investigations in active seismology
- 49 **Hummel E. E., Zakharov Y. N.** Unsteady flow problem in branched channels
- 54 **Dobretsov N. N., Zolnikov I. D., Glushkova N. V., Lyamina V. A., Sokolov K. S., Makunina N. I., Smirnov V. V., Pchelnikov D. V.** Technologies of natural-anthropogenic ecosystems computer mapping and modelling on the example of Novosibirsk Akademgorodok
- 61 **Zakharov Y. N., Zelenskiy E. E., Rodina M. S.** Mathematical modelling of an underground gasifier work with the flow method
- 68 **Ivushkin A. A., Shipunov M. V., Grachev V. V., Myshlyaev L. P.** Combined simulation as the basis for solving the tasks of automated complex development
- 75 **Kartashov V. J., Behtgold I. V.** Application of multi-frequency quantization in digital systems of monitoring and control
- 83 **Komarova M. V.** Dimensions of Prym differentials spaces with variable divisors
- 89 **Molorodov Y. I., Minkov V. S.** Information computational system for the analysing the influence of pollution on biological objects

- 97 **Ноженкова Л. Ф., Ничепорчук В. В.** Экспертная гис поддержки принятия решений в паводкоопасных ситуациях для территорий Сибирского региона
- 104 **Пестунов И. А., Рылов С. А.** Алгоритмы спектрально-текстурной сегментации спутниковых изображений высокого пространственного разрешения
- 110 **Пестунов И. А., Синявский Ю. Н.** Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений
- 125 **Рапута В. Ф.** Численный анализ данных наземного радиационного мониторинга в окрестностях АЭС «Фукусима – 1»
- 131 **Самойлова С. Ю.** Мониторинг горных ледников: задачи, новые методы, перспективы
- 136 **Якубайлик О. Э., Гостева А. А., Ерунова М. Г., Кадочников А. А., Матвеев А. Г., Пятаев А. С., Токарев А. В.** Разработка средств информационной поддержки наблюдений за состоянием окружающей природной среды
- ФИЗИКА**
- 143 **Битехтина М. А., Михайлюта С. В., Леженин А. А., Тасейко О. В.** Эволюция пограничного слоя и особенности загрязнения атмосферы города
- 148 **Кузьменко В. С., Янчуковский В. Л., Анцыз Е. Н.** Распределение плотности температурного коэффициента интенсивности мюонов в атмосфере и высотный ход температуры
- 153 **Куксов И. А., Сарычев В. Д., Мочалов С. П., Карпенко В. И.** Исследование закрученного потока газа в цилиндрической камере на основе численного моделирования в STAR CMM+
- 157 **Невзоров Б. П., Салтанова Е. В., Сухих А. С., Фадеев Ю. А.** Спектроскопическое изучение взаимосвязи колебаний карбонильных групп в кроконовой кислоте
- ХИМИЯ**
- 164 **Ермакова Л. А., Мочалов С. П., Калашиников С. Н., Пермяков А. А.** Механизм горения капель суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке автоматизированного энергогенерирующего комплекса
- 169 **Пугачев В. М., Додонов В. Г., Васильева О. В., Карпушкина Ю. В., Захаров Ю. А.** Получение нанокристаллических порошков системы никель-медь
- 174 **Пугачев В. М., Попова А. Н., Зюзюкина Е. Н., Захаров Ю. А.** Исследование продуктов синтеза наноразмерных систем Fe-Co
- 180 **Счастливцев Е. Л., Пушкин С. Г., Воротилов А. А.** Некоторые результаты использования гидрохимичеки ориентированного программного комплекса для оценок ионного состава техноприродных вод Кузбасса
- 188 **Информация для авторов**
- 190 **Подписка на журнал «Вестник КемГУ»**
- 97 **Nozhenkova L. F., Nicheporchuk V. V.** Expert GIS for decision-making support in floods for the Siberian region
- 104 **Pestunov I. A., Rylov S. A.** Spectral-textural segmentation algorithms for satellite images with high spatial resolution
- 110 **Pestunov I. A., Sinyavskiy Yu. N.** Clustering algorithms in satellite images segmentation tasks
- 125 **Raputa V. F.** Numerical analysis of the data of surface radiation monitoring in the vicinity of the nuclear power station «Fukushima – 1»
- 131 **Samoylova S. Y.** Mountain glaciers monitoring: problems, new methods, expectations
- 136 **Yakubailik O. E., Gosteva A. A., Erunova M. G., Kadochnikov A. A., Matveev A. G., Pyataev A. S., Tokarev A. V.** Developing information support tools for observations of the environment state
- PHYSICS**
- 143 **Bitekhtina M. A., Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Taseiko O. V.** Lapse rate evolution and urban air pollution
- 148 **Kuzmenko V. S., Yanchukovskiy V. L., Antsyz E. N.** The density distribution of the temperature coefficient of muons intensity in the atmosphere and altitudinal temperature variation
- 153 **Kuksov I. A., Sarychev V. D., Mochalov S. P., Karpenok V. I.** Exploring the swirl gas flow in cylindrical chamber by numerical modeling in STAR-CCM+ software
- 157 **Nevzorov B. P., Saltanova E. V., Sukhih A. S., Fadeev Y. A.** Spectroscopic research of intermolecular interaction in croconic acid
- CHEMISTRY**
- 164 **Ermakova L. A., Mochalov S. P., Kalashnikov S. N., Permyakov A. A.** Mechanism of combustion drops of water-coal fuel suspension in a swirling-type furnace of an automated energy generating complex
- 169 **Pugachev V. M., Dodonov V. G., Vasiljeva O. V., Kharpushkina Yu. V., Zaharov Yu. A.** Synthesis of the nanocrystalline powder nickel-copper
- 174 **Pugachev V. M., Popova A. N., Zyuzukina E. N., Zaharov Yu. A.** Study of products of nanoscale systems Fe-Co synthesis
- 180 **Schastlivtsev E. L., Pushkin S. G., Vorotilov A. A.** Prospects of application hydrochemical software complex for evaluation of ionic compound of Kuzbass natural waters
- 188 **Information for authors**
- 190 **Subscribe to Bulletin of KemSU**

МАТЕМАТИКА

УДК 514.132

О ПЛОЩАДИ ТРАПЕЦИИ В СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Г. А. Байгонакова, Д. Ю. Соколова

ON THE AREA OF A TRAPEZOID IN SPHERICAL GEOMETRY

G. A. Baigonakova, D. Yu. Sokolova

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 12-01-90701-моб_ст и 12-01-00210-а) и Совета по грантам при президенте Российской Федерации (гранты МК-4447.2012.1 и НШ-921.2012.1).

В данной статье получена формула площади сферической трапеции через длины ее сторон. In this paper we give a formula for the area of a spherical trapezoid in terms of its sides lengths.

Ключевые слова: сферическая геометрия, площадь, трапеция.

Keywords: spherical geometry, area, trapezoid.

1. Введение

Из элементарной геометрии нам известна формула площади треугольника S через длины его сторон a , b и c . Она может быть представлена в следующем виде:

$$S^2 = (p-a)(p-b)(p-c)p,$$

где $p = \frac{a+b+c}{2}$ – полупериметр треугольника. Она известна как формула Герона.

Площадь четырехугольника, вообще говоря, не определяется через длины его сторон. Однако, это справедливо в некоторых частных случаях, например, когда четырехугольник является вписанным, либо когда он представляет собой трапецию. В первом случае его площадь описывается формулой Брахмагупты:

$$S^2 = (p-a)(p-b)(p-c)(p-d),$$

где a, b, c, d – длины сторон четырехугольника, а $p = \frac{a+b+c+d}{2}$ его полупериметр. Формулу Брахмагупты и её доказательство можно найти в книге [7, с. 90].

Во втором случае площадь трапеции находится через длины её сторон элементарными вычислениями по формуле, приведённой ниже.

Отметим, что для сферического четырехугольника формула площади через длины его сторон и диагонали была получена в монографии [4, с. 165]. Она имеет следующий вид.

Теорема 1. Площадь S сферического четырехугольника $ABCD$ со сторонами a, b, c, d и диагоналями e, f находится из соотношения:

$$\sin^2 \frac{S}{4} = \frac{(\sin \frac{e}{2} \sin \frac{f}{4} + \cos \frac{a}{2} \cos \frac{c}{2} - \cos \frac{b}{2} \cos \frac{d}{2})(\sin \frac{e}{2} \sin \frac{f}{4} - \cos \frac{a}{2} \cos \frac{c}{2} + \cos \frac{b}{2} \cos \frac{d}{2})}{4 \cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2} \cos \frac{d}{2}}. \quad (1)$$

Напомним [3], что выпуклый четырехугольник вписан в окружность тогда и только тогда, когда выполнено равенство

$$\sin \frac{e}{2} \sin \frac{f}{4} = \sin \frac{a}{2} \sin \frac{c}{2} + \sin \frac{b}{2} \sin \frac{d}{2}.$$

Подставляя это соотношение в формулу (1) получим следующий сферический аналог формулы Брахмагупты [4, с. 46].

Следствие. Площадь S вписанного в окружность сферического четырехугольника $ABCD$ со сторонами a, b, c, d находится по формуле:

$$\sin^2 \frac{S}{4} = \frac{\sin \frac{p-a}{2} \sin \frac{p-b}{2} \sin \frac{p-c}{2} \sin \frac{p-d}{2}}{\cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2} \cos \frac{d}{2}}.$$

В гиперболическом случае варианты формул Брахмагупты для вписанного четырехугольника представлены в работе [2]. Формула площади трапеции на гиперболической плоскости через длины её сторон получена в работе одного из авторов [8].

Цель настоящей статьи – перенести результаты работы [8] на сферический случай. Все приведённые ниже результаты будут сформулированы для сферической плоскости с гауссовой кривизной $k = 1$. Необходимые сведения по сферической геометрии приведены в книге [5].

2. Основной результат

Определение. Выпуклый четырехугольник ABCD называется трапецией, если для его внутренних углов справедливо соотношение

$$\angle A + \angle B = \angle C + \angle D. \quad (2)$$

Замечание. Данное определение трапеции эквивалентно общепринятому в евклидовой геометрии.

В этом случае стороны AD и BC называются основаниями трапеции, а AB и CD – ее боковыми сторонами. Длины сторон AB, BC, CD, AD будем обозначать соответственно, буквами a, b, c, d ; длины диагоналей AC и BD – буквами e и f (рис. 1).

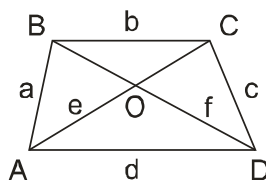


Рис. 1. Трапеция

Всюду в дальнейшем будем предполагать, что трапеция является выпуклым четырёхугольником и $b \neq d$. При $b = d$, как и в евклидовой геометрии (случай параллелограмма), площадь трапеции не определяется по длинам её сторон.

Для вычисления площади трапеции нам потребуется следующая теорема. В гиперболическом случае она доказана в работе Ф. В. Петрова [6].

Теорема 2. Пусть ABCD – выпуклый четырёхугольник в сферической геометрии. Тогда следующие два свойства эквивалентны:

$$(i) \quad \angle BAD + \angle ABC = \angle ADC + \angle DCB.$$

$$(ii) \quad \angle CAD + \angle CBD = \angle BCA + \angle BDA.$$

Доказательство. Выведем (ii), предполагая (i). Пусть точка E симметрична точке D относительно середины AB , и точка F симметрична точке A относительно середины CD , тогда равны пары треугольников: $\triangle ABE = \triangle BAD$ и $\triangle CDA = \triangle BDA$ (рис. 2.)

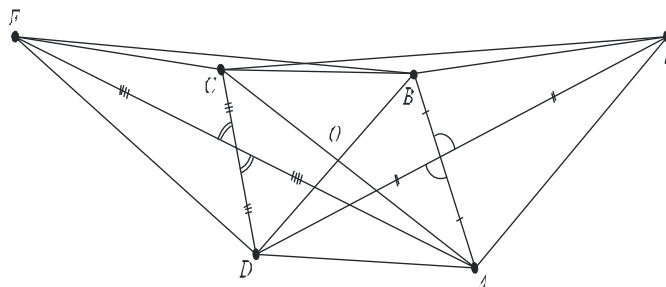


Рис. 2. Выпуклый четырёхугольник

По двум сторонам и углу между ними равны $\triangle EBC$ и $\triangle FCB$

$$\begin{aligned} (\angle EBC &= 2\pi - (\angle CBA + \angle ABE) = \\ &= 2\pi - (\angle CBA + \angle DAB) = \\ &= 2\pi - (\angle BCD + \angle CDA) = \\ &= 2\pi - (\angle BCD + \angle DCF) = \angle FCB). \end{aligned}$$

Значит, $EC = FB$, и по трем сторонам равны треугольники $\triangle FBD = \triangle ACE$, так что $\angle FDB = \angle CAE$. Откуда из равенств $\angle FDC = \angle DCA$ и $\angle BAE = \angle DBA$ следует, что $\angle DBA + \angle CAB = \angle BDC + \angle DCA$. Вычитая последнее равенство из (i), получаем (ii).

Для вывода (i) из (ii) надо рассмотреть точку, симметричную D относительно середины AC , и точку, симметричную A относительно BD середины, и провести аналогичные рассуждения.

Заметим, что каждое из свойств (i) и (ii) равносильно тому, что четырехугольник $ABCD$ является трапецией с основаниями BC и AD . Вычитая из первого равенства второе, получим, что справедлива следующая лемма.

Лемма. Для трапеции $ABCD$ справедливо соотношение

$$\angle DBA + \angle CAB = \angle BDC + \angle DCA.$$

В силу формулы Гаусса-Бонне площади треугольников AOB и COD находятся по формулам:

$$S_{AOB} = \angle CAB + \angle ABD + \angle AOB - \pi,$$

$$S_{COD} = \angle ACD + \angle CDB + \angle COD - \pi.$$

Учитывая утверждение леммы и равенство вертикальных углов $\angle AOB = \angle COD$, получим, что $S_{AOB} = S_{COD}$.

Отсюда непосредственно заключаем, что имеют место равенства площадей $S_{ADB} = S_{ADC}$ и $S_{ABC} = S_{BCD}$. Обозначим через $S(a, b, c)$ площадь сферического треугольника с длинами сторон a, b, c . Переписывая полученные два равенства в терминах длин сторон, установим, что справедливо следующее следствие.

Следствие. Для площадей треугольников с соответствующими сторонами выполнены равенства

$$\begin{cases} S(a, d, f) = S(c, d, e), \\ S(b, a, e) = S(b, c, f). \end{cases} \quad (3)$$

Из работы [5] известна следующая формула для площади S сферического треугольника со сторонами a, b, c :

$$\tan \frac{S(a, b, c)}{4} = \sqrt{\frac{\tan \frac{a+b+c}{4} \tan \frac{b+c-a}{4} \tan \frac{a-b+c}{4} \tan \frac{a+b-c}{4}}{\tan \frac{a-b+c}{4} \tan \frac{a+b-c}{4}}}, \quad (4)$$

которая элементарными преобразованиями приводится к следующему сферическому аналогу формулы Билински [1]

$$\cos \frac{S(a, b, c)}{2} = \frac{\cos(a) + \cos(b) + \cos(c) + 1}{4 \cos \frac{a}{2} \cos \frac{b}{2} \cos \frac{c}{2}}. \quad (5)$$

Положим $c(a) = \cos(\frac{a}{2})$ и $s(a) = \sin(\frac{a}{2})$. Подставляя равенство $\cos(a) = 2c^2(a) - 1$ в уравнение (5), получим, что система уравнений (3) эквивалентна следующей:

$$\begin{cases} \frac{c^2(a) + c^2(d) + c^2(f) - 1}{c(a)c(f)} = \frac{c^2(c) + c^2(d) + c^2(e) - 1}{c(c)c(e)}, \\ \frac{c^2(a) + c^2(b) + c^2(e) - 1}{c(a)c(e)} = \frac{c^2(c) + c^2(b) + c^2(f) - 1}{c(c)c(f)}. \end{cases} \quad (6)$$

Решая эту систему на компьютере относительно $c(e)c(f)$ и $\frac{c(e)}{c(f)}$, получим следующее предложение.

Предложение. Длины сторон и диагоналей трапеции связаны соотношениями

$$\begin{cases} c(e)c(f) = c(a)c(e) - s(b)s(d), \\ \frac{c(e)}{c(f)} = \frac{c(c)s(b) - c(a)s(d)}{c(a)s(b) - c(c)s(d)}. \end{cases} \quad (7)$$

Из данной системы уравнений находятся выражения для длин диагоналей трапеции $ABCD$:

$$c^2(e) = \frac{c(c)s(b) - c(a)s(d)}{c(a)s(b) - c(c)s(d)}(c(a)c(c) - s(b)s(d)), \quad (8)$$

$$c^2(f) = \frac{c(a)s(b) - c(c)s(d)}{c(c)s(b) - c(a)s(d)}(c(a)c(c) - s(b)s(d)). \quad (9)$$

Сформулированное предложение потребуется для доказательства теоремы о площади трапеции.

Теорема 3. Площадь S сферической трапеции $ABCD$ со сторонами a, b, c, d находится из соотношения:

$$\tan^2 \frac{S}{4} = \frac{\sin^2 \frac{b+d}{2} \sin \frac{a+b-c-d}{4} \sin \frac{a+b+c-d}{4} \sin \frac{-a+b+c-d}{4} \sin \frac{a-b+c+d}{4}}{\sin^2 \frac{b-d}{2} \cos \frac{a-b-c-d}{4} \cos \frac{a-b+c-d}{4} \cos \frac{a+b-c+d}{4} \cos \frac{a+b+c+d}{4}}.$$

Замечание. Евклидов вариант формулы, выражающий квадрат площади трапеции через её стороны, находится элементарными вычислениями из геометрических соображений и имеет вид:

$$S_E^2 = \frac{(b+d)^2(a+b-c-d)(a+b+c-d)(-a+b+c-d)(a-b+c+d)}{16(b-d)^2}.$$

Отметим также, что $\tan^2 \frac{S}{4} \approx (\frac{S_E}{4})^2$ при достаточно малых величинах a, b, c, d .

Доказательство. Рассмотрим трапецию $ABCD$, изображенную на рисунке 1. Для вычисления её площади воспользуемся формулой (1) и представим ее в следующем виде:

$$\sin^2 \frac{S}{4} = \frac{(s(e)(f))^2 - (c(a)c(c) - c(b)c(d))^2}{4c(a)c(b)c(c)c(d)}. \quad (10)$$

Вычисляя выражение $(s(e)s(f))^2 = (1 - c^2(e))(1 - c^2(f))$ по формулам (8), (9) и подставляя полученное значение в (10), после упрощения на компьютере получим:

$$\sin^2 \frac{S}{4} = \frac{\sin^2 \frac{b+d}{2} \sin \frac{a+b-c+d}{4} \sin \frac{a+b+c-d}{4} \sin \frac{a-b-c+d}{4} \sin \frac{a-b+c+d}{4}}{c(b)c(d)(c(c)s(b) - c(a)s(d))(c(c)s(d) - c(a)s(b))}. \quad (11)$$

Далее,

$$\cos^2 \frac{S}{4} = \frac{\sin^2 \frac{b-d}{2} \cos \frac{a-b-c-d}{4} \cos \frac{a-b+c-d}{4} \cos \frac{a+b-c+d}{4} \cos \frac{a+b+c+d}{4}}{c(b)c(d)(c(c)s(b) - c(a)s(d))(c(a)s(b) - c(c)s(d))}. \quad (12)$$

Поделив (11) на (12), имеем утверждение теоремы

$$\tan^2 \frac{S}{4} = \frac{\sin^2 \frac{b+d}{2} \sin \frac{a+b-c-d}{4} \sin \frac{a+b+c-d}{4} \sin \frac{-a+b+c-d}{4} \sin \frac{a-b+c+d}{4}}{\sin^2 \frac{b-d}{2} \cos \frac{a-b-c-d}{4} \cos \frac{a-b+c-d}{4} \cos \frac{a+b-c+d}{4} \cos \frac{a+b+c+d}{4}}.$$

Что и требовалось доказать.

Литература

1. Bilinski, S. Zur Begrundung der elementaren Inhaltslehre in der hyperbolischen Ebene / S. Bilinski // Math. Ann. – 1969.
2. Mednykh, A. D. Brahmapu formula for cyclic quadrilaterals in the hyperbolic plane / A. D. Mednykh // Sib. Electron. Math. Reports. – 2012 to appear.
3. Valentine, J. E. An Analogue of Ptolemy's Theorem in Spherical Geometry / J. E. Valentine // Amer. Math. Monthly. – 1970. – Vol. 77.
4. M'Clelland, W. J. A Treatise on Spherical Trigonometry with application to Spherical Geometry and Numerous Examples. Part II / W. J. M'Clelland, T. Preston. – London: Macmillan and Co, 1886.
5. Алексеевский, Д. В. Геометрия пространств постоянной кривизны / Д. В. Алексеевский, Э. Б. Винберг, А. С. Солодовников // Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – М.: ВИНТИ. – 1988. – Т. 29.

6. Петров, Ф. В. Вписанные четырехугольники и трапеции в абсолютной геометрии / В. Ф. Петров // Математическое просвещение. – Сер. 3. – 2009. – Вып. 13.
7. Понарин, Я. П. Элементарная геометрия. Планиметрия / Я. П. Понарин. – М.: МЦНМО, 2004. – Т. 1.
8. Соколова, Д. Ю. О площади трапеции на плоскости Лобачевского / Д. Ю. Соколова // Сиб. электрон. мат. изв. – 2012.

Информация об авторах:

Байгонакова Галия Аманболдыновна – аспирант кафедры математического анализа, Горно-Алтайский государственный университет, т. 8(913) 691-8816, galyaab@mail.ru.

Bajgonakova Galiya Amanboldynovna – post-graduate student at the Department of Mathematical Analysis of Gorno-Altaysk State University.

Соколова Дарья Юрьевна – аспирант лаборатории теории функции Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, т. 8(913) 460-2823, from_dasha@mail.ru.

Sokolova Daria Yurievna – post-graduate student at the Laboratory of Function theory of S. L. Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 551.511.61

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ НА МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ОСАЖДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЫЛИ

А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин

THE INFLUENCE OF VARIABILITY OF METEOROLOGICAL DATA FREQUENCY AND AIR EMISSIONS PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS ON MODEL ESTIMATES OF INDUSTRIAL DUST DEPOSITION

A. A. Bykov, E. L. Schastlivtsev, S. G. Pushkin

Рассматривается влияние изменчивости входных данных на результаты разработанной авторами локальной модели расчета осаднения промышленной пыли. Для этого использованы реальные распределения метеопараметров за три года и возможные распределения промышленных пылевых выбросов по размерам частиц.

The paper deals with the influence of initial data variability on the results of long-term dust deposition model that has been elaborated by the authors for ecological expertise purposes. Real meteo data season distributions and industrial emissions particle size distributions are considered.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, выпадение пылевых частиц, долгосрочное моделирование, роза ветров, дисперсный состав выброса.

Keywords: air pollution, dust deposition, long-term modeling, wind rose, wind speed, particle size distribution.

Введение

Одной из составляющих частей мониторинга промышленных выбросов и загрязнения воздуха являются модельные оценки распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере [10]. Известно, что для этого существует целый ряд моделей, различных по научной основе, пространственным и временным характеристикам. Однако в России, как и в каждой стране, существует единая инженерная (регуляторная) модель ОНД-86 [12] для государственного управления выбросами промышленных предприятий в атмосферу. Она обязана обеспечивать воспроизводимость и сопоставимость проектных расчетов, поэтому базируется на однозначно трактуемых инструкциях и зависимостях и использует стандартизированные исходные данные.

Модель [12] предназначена для вычисления максимальных разовых (осредненных за 20 минут) концентраций ЗВ в приземном слое. Именно они не должны превышать разовые предельно допустимые концентрации (ПДК) при определении допустимости воздействия предприятия на атмосферный воздух. Другие модели и другие показатели не являлись нормативными и не влияли до 01.03.2008 г. на принятие решений о допустимости строительства предприятий, определения размеров их санитарно-защитных зон (СЗЗ) и установлении предельно-допустимых выбросов. Однако 01.03.2008 г. вышел новый документ [14], где

появилось требование о том, что при установлении СЗЗ для предприятий 1-го и 2-го классов опасности необходима оценка рисков здоровью населения, которые в плане загрязнения атмосферы базируются на среднегодовых концентрациях [13]. Для этой цели в ГГО им. А. И. Воейкова разработана в качестве дополнения к ОНД-86 нормативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период [8, с. 11 – 31; 11]. Рассмотренные выше документы относятся только к концентрациям ЗВ в атмосфере и не рассматривают вопросы поступления ЗВ из атмосферы в объекты, расположенные на земной поверхности.

Выбросы такого крупного угледобывающего промышленного региона, как Кузбасс, характерны тем, что содержат большой процент пылевых частиц разнообразного химического состава, обладающих эффектом оседания на подстилающую поверхность. При этом не исключена ситуация, когда промышленные выбросы, будучи допустимыми с точки зрения максимального разового загрязнения атмосферы, могут привести к весьма существенному накоплению вредных веществ на поверхности. Многолетнее оседание из атмосферы и накопление в почве техногенной пыли может снизить урожайность земель и повысить содержание ЗВ в сельскохозяйственной продукции до величин, превосходящих допустимые нормы. Загрязнение снегового покрова в течение зимнего периода с последующим стоком талых вод в водоемы может значительно ухудшить качество воды. Таким образом, изучение процессов вторичного поступления ЗВ из атмосферы в почву, воду и продукты питания требует самого пристального внимания.

Модель расчета выпадения

Для проведения количественной оценки осаждения твердых частиц на заданную территорию авторами разработана и доведена до практического использования модель расчета потока пылевых частиц промышленного происхождения на подстилающую поверхность. Модель базируется на работах [6, с. 3 – 15; 9] и дает возможность по данным о параметрах ИЗА, фракционному составу выбрасываемой пыли и климатическим параметрам территории оценить среднегодовую приземную концентрацию q , мокрый поток на подстилающую поверхность (вымывание) P_m , сухой поток (осаждение) P_c и полный поток P , представляющий собой сумму двух названных составляющих $P = P_m + P_c$.

Расчет среднегодового мокрого потока P_m , г/(м²год) загрязняющих веществ, выбрасываемых единственным точечным источником загрязнения атмосферы (ИЗА) на подстилающую поверхность в заданной точке, осуществляется по формуле [9]:

$$P_m = \frac{(1+b)M}{2\pi u r L_0} \left[a L_{\text{л}} t_{\text{вл}} \sum_{i=1}^K m_i y_i \exp\left(-\frac{a y_i r}{u}\right) + L_{\text{з}} t_{\text{вз}} \sum_{i=1}^K m_i y_i \exp\left(-\frac{y_i r}{u}\right) \right], \quad (1)$$

где b – относительный вклад смешанных атмосферных осадков в их общее количество; M – масса твердых ЗВ, выбрасываемых ИЗА в течение года, г/год; u – среднегодовая средняя скорость ветра в слое распространения примесей, м/сек; r – расстояние от ИЗА, м; L_0 – повторяемость направления ветра данного румба для круговой розы ветров; a – эмпирическая поправка на отличие в интенсивности вымывания жидкими и твердыми осадками; $L_{\text{л}}$, $L_{\text{з}}$ – повторяемости направлений ветра данного румба для летней и зимней розы ветров соответственно; $t_{\text{вл}}$, $t_{\text{вз}}$ – относительные (в долях года) продолжительности выпадения жидких и твердых осадков; K – число рассматриваемых фракций частиц; m_i – доля общей массы выброса, приходящейся на i -ю фракцию частиц; y_i – постоянная вымывания i -й фракции, с⁻¹.

Среднегодовой сухой поток частиц P_c , г/(м²год), оценивается в виде суммы [9]:

$$P_c = \sum_{i=1}^K (V_{\text{из}} t_{\text{цз}} + V_{\text{ил}} t_{\text{цл}}) q_i(m_i M, r, \phi), \quad (2)$$

где r и ϕ – полярные координаты расчетной точки относительно источника и направления на север; $V_{\text{из}}$, $V_{\text{ил}}$ – скорости осаждения i -ой фракции частиц в зимний и летний периоды, м/сек; $t_{\text{цз}}$ – продолжительность периода залегания снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков в этот период, сек; $t_{\text{цл}}$ – продолжительность периода отсутствия снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков, сек; q_i – среднегодовая приземная концентрация i -ой фракции, г/м³. Расчет производится в каждой интересующей точке отдельно по фракциям частиц с различными параметрами осаждения, после чего результаты

складываются для получения суммарного P_c для данного ИЗА. Для множества источников осаждение в расчетной точке есть сумма по отдельным ИЗА.

Соотношения (1) и (2) показывают, что в рамках принятой модели можно легко оценить сезонное выпадение. В частности, для расчета осаждения в снеговой покров (зимний период) достаточно положить $t_{вл} = t_{сл} = 0$ и использовать суммарный выброс M для каждого ИЗА только за зимний период. При расчете среднегодовых концентраций q_i следует, естественно, использовать только зимнюю розу ветров L_z и другие необходимые метеопараметры и их распределения за зимний период.

Возможные причины погрешностей моделирования

Все упомянутые выше расчетные схемы программно реализованы в составе широко используемого для проектных и управленческих работ в Сибирском регионе программного комплекса “ЭРА” [5, с. 74 – 82] (подробнее см. <http://www.logos-plus.ru/>). Это позволяет использовать накопленные в форматах данного комплекса исходные данные для научных исследований, не входящих в состав регламентированных нормативными документами проектных работ.

Результаты опытной эксплуатации модели и ее сопоставление с данными натурных наблюдений рассматривались в статьях авторов [2, с. 80 – 83; 4, 209 – 21]. Проведенные там практические расчеты для промышленных объектов Кемеровской области, показывают, что построенная модель, несмотря на простоту, достаточно хорошо отражает тенденции осаждения частиц по исследуемой территории. Что касается количественного сопоставления, то расчетные оценки, как правило, существенно превосходят результаты натурных наблюдений (в нормативных базах выбросы источников указаны на максимальную производительность предприятий). Тем не менее, обычно удается подобрать единый для всех экспериментальных точек множитель, после которого общий ход расчетных и измеренных величин совпадает так, что его вряд ли можно назвать случайным.

Причинами расхождения расчетных и измеренных величин могут быть погрешности модели, неточности исходных данных, погрешности проведения самих замеров и т. д. Для выяснения вопроса о том, что в наибольшей степени влияет на результат моделирования, рассмотрим влияние модельных соотношений и основных исходных данных.

Вымывание P_m определяется в первую очередь интенсивностью осадков, их способностью захватывать частицы примеси и скоростью ветра в слое распространения примесей. Как показывают численные эксперименты, характер кривой убывания по расстоянию от источника в формуле (1) слабо влияет на конечный результат при осреднении за год или сезон. Поэтому влияние мокрого осаждения определяется не столько видом зависимости (1), сколько обоснованностью задания входящих в эту зависимость параметров. Кроме того, как отмечается в [6, с. 3 – 15], вымывание дает заметный вклад только вблизи источника.

Результат расчета сухого осаждения зависит главным образом от качества модели расчета среднегодовых (среднесезонных) концентраций q_i , входящих в выражение (2). Известно, что построение таких моделей в большинстве случаев основано на расчете концентраций при заданных метеоусловиях с последующим осреднением с известными распределениями мощностей выбросов и метеоусловий в течение года (сезона).

Основное соотношение, используемое в [11] для вычисления средней за заданный период времени концентрации $q(M_o, r, \phi)$ в полярных координатах r, ϕ имеет вид:

$$q(M_o, r, \phi) = \frac{p_1(\phi)M_o}{r} \int_0^\infty du \int_0^\infty d\lambda p_2(u) p_3(\lambda) q_o(r, u, \phi, \lambda, H_e). \quad (3)$$

Расшифровка обозначений, формулы для подынтегральной функции q_o и эффективной высоты источника H_e представлены в [6, с. 3 – 15], M_o – средний выброс примеси из источника за период осреднения.

Для практического использования соотношения (3), в дополнение к стандартным данным, необходимо задать для интересующего периода осреднения плотности распределения трех метеорологических параметров: направления ветра $p_1(\phi)$; скорости ветра $p_2(u)$ и интенсивности турбулентного перемешивания $p_3(\lambda)$. Здесь: $\lambda = 1.15 K_1 / u_2$; K_1 – значение коэффициента турбулентности на уровне 1 м, определенное согласно Наставлению по наблюдениям на теплобалансовых станциях; u_2 – измеренное в рассматриваемый срок значение скорости ветра на уровне 2 м. Метод перехода от стандартной 8-и румбовой розы ветров, которая представлена в выражении (1) как L_n и L_z , к функции $p_1(\phi)$, описан в [11], а рекомендуемый вид распределений $p_2(u)$ и $p_3(\lambda)$ приведен в [8].

В предыдущих методических указаниях [9] предлагалась модель расчета осредненных за длительный период концентраций с упрощенной технологией вычислений, где вместо интегралов используются средние значения скорости ветра $\bar{u}$ (как в формуле (1)) и показателя стратификации атмосферы A , установленного для различных районов РФ с целью единообразного использования нормативной методики ОНД-86. Сами же приближенные формулы, представленные в [9], дают возможность пересчитать аналог функции q_0 через параметры источника, предназначенные для расчета максимального разового загрязнения атмосферы.

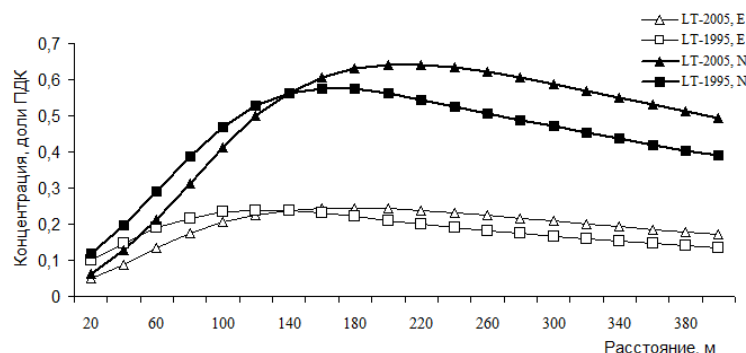


Рис. 1. Сравнение среднегодовой концентрации (в долях ПДК) газообразной примеси, рассчитанной по модели [11] (LT-2005) и модели [9] (LT-1995). Верхняя пара кривых (жирные линии) соответствует северному (N) направлению ветра, а нижняя – западному (E)

Обе модели реализованы в программном комплексе ЭРА, причем расчетный модуль для модели [11] протестирован и согласован экспертами ГГО им. А. И. Воейкова для использования в проектных работах. Обе модели используют единые входные данные по источникам и процедуру сглаживания розы ветров. Один из примеров сравнения результатов расчетов с использованием этих моделей представлен на рисунке 1. Эти расчеты были проведены для неорганизованного площадного пылящего источника с высотой 12 метров и горизонтальными размерами 60 x 100 метров. Такой источник является характерным (размеры, конечно, могут быть различные) для угольной промышленности и является в нормативных базах приближением угольных складов или отвалов породы. Метеорологические данные соответствуют метеостанции г. Белово за зимний сезон 2009 – 2010 годов. Эта станция является представительной для большей части Ерунаковского угледобывающего района Кузбасса, который весьма интенсивно разрабатывается в настоящее время.

Рисунок 1 показывает, что использование различных моделей для расчета концентрации, скорее всего, не может являться причиной больших ошибок при расчете сухого осаждения. Это также согласуется с выводом С. Ханна [1] о том, что долгосрочные модели атмосферной диффузии дают результаты с погрешностью не более 20 %. Таким образом, упрощенная модель [9] может быть применима для быстрых оценочных расчетов, поскольку вычисление интегралов с погрешностью не более 2 – 3 % в полной формуле (3) занимает на порядок больше времени.

Оценка влияния изменчивости метеопараметров и дисперсного состава

Как правило, при нормативных расчетах среднегодовых концентраций [11] и базирующихся на них хронических и канцерогенных рисков для здоровья населения [13] используются климатические повторяемости $p_1(\varphi)$, $p_2(u)$ и $p_3(\lambda)$ метеорологических параметров. Они могут быть запрошены для территории расположения города или промышленного предприятия в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Однако, при сопоставлении с натурными наблюдениями (например, с данными снеговых проб) представляется интересным знать распределения метеопараметров для конкретного года или сезона. С целью определения влияния изменчивости метеопараметров от года к году мы обработали данные стандартных метеорологических наблюдений для района г. Белово за три года (данные взяты с сайта www.gr5.ru).

Влияние реальной для данной территории изменчивости распределения $p_3(\lambda)$, климатический вид которого рассчитывается в ГГО им. А. И. Воейкова, оценить пока не представляется возможным, поскольку данные теплобалансовых станций отсутствуют (как и сами станции), а метод расчетной оценки [7] предполагает знание температуры почвы, которая не приводится в составе стандартных 8-и срочных наблюдений. Построение конкретных распределений $p_3(\lambda)$ станет возможным в ближайшее время, по мере накопления данных с приобретенного в 2012 году ультразвукового метеорологического

комплекса АМК-03, разработанного в ИМКЭС СОРАН и позволяющего определять характеристики турбулентности, в том числе и K_L .

Изменчивость распределения скорости ветра $p_2(u)$ и ее влияние на расчет средних концентраций при круговой розе ветров показаны на рисунке 2. Из трех обработанных зимних сезонов оставлены только два с максимальными отклонениями, поскольку распределение $p_2(u)$ для зимы 2010 – 2011 годов практически полностью повторяет таковое за зиму 2009 – 2010 годов.

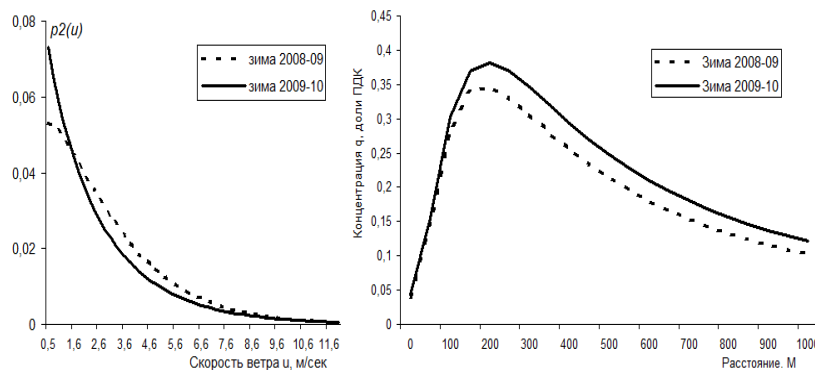


Рис. 2. Естественные изменения плотности распределения скорости ветра (слева) и их влияние на расчет среднегодовой концентрации от площадного источника при круговой розе ветров (справа)

Несмотря на то, что зима 2009 – 2010 годов отличалась заметно большей повторяемостью слабых скоростей ветра, влияние данных отличий на результат расчета среднегодовой концентрации от неорганизованного пылящего источника (отвал) составляет порядка 10 % в районе максимума концентрации (250 м от центра источника) и далее слабо затухает.

На рисунке 3 показаны изменения от года к году повторяемости направлений ветра (розы ветров) за зимние периоды трех последних лет. Получена оценка влияния соответствующих сглаженных функций $p_1(\varphi)$ на расчетные значения сухого осаждения пыли от неорганизованного площадного источника в западном и северном направлениях. При этом во всех трех расчетах использован единый дисперсный состав m_{il} суммарного выброса, приведенный в таблице в 4-й строке (Распределение 1). Нетрудно заметить, что влияние естественной изменчивости повторяемости направлений ветра только за 3 года может привести к различию в результатах суммарного осаждения пыли почти в 2 раза.

Параметры выброса промышленных источников, содержащиеся в базах данных для нормативных расчетов, в большинстве случаев получаются с привлечением расчетных методов, официально рекомендованных в РФ для тех или иных типов производственных процессов. Рассчитанные параметры контролируются природоохранными властями на этапе утверждения проектов. В результате можно считать, что данные инвентаризации выбросов являются подобными для одинаковых типов производств. И если величина выброса какого-то источника содержит погрешность, то она с большой долей вероятности характерна и для остальных аналогичных источников тех же производств. Таким образом, в силу линейности формул (1) и (3) погрешности определения мощностей выброса промышленных источников приводят в рамках данной модели к систематической ошибке при расчете средней концентрации q_i .

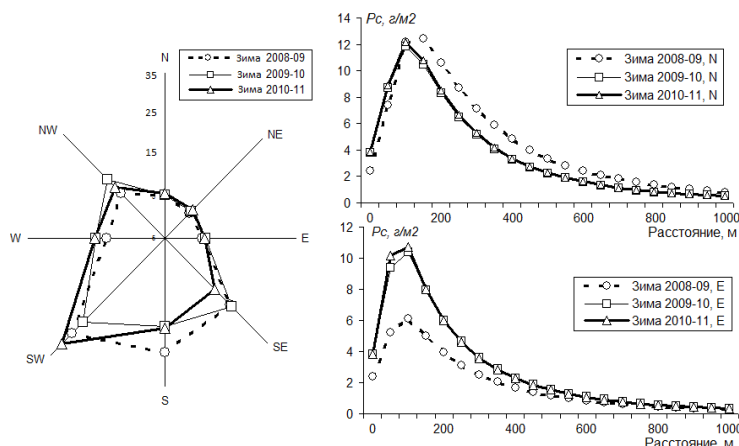


Рис. 3. Изменчивость зимней розы ветров г. Белово и ее влияние на расчет выпадения пылевых частиц в северном (N) и западном (E) направлениях от неорганизованного площадного источника

Таблица

Три варианта дисперсного состава выброса пылящего источника

Номер фракции, i	1	2	3	4	5
Размер частиц, μm	<1	1-10	10-50	50-100	>100
Скорость осаждения, V_i , м/с	0.001	0.007	0.04	0.15	0.5
Распределение 1, $100m_{i1}, \%$	20	47	22	8	3
Распределение 2, $100m_{i2}, \%$	15	40	30	10	5
Распределение 3, $100m_{i3}, \%$	50	30	18	2	1

Однако нормативные базы данных не содержат в настоящее время информации о распределении m_i частиц по размерам в суммарных пылевых выбросах M . На рисунке 4 показаны результаты модельных расчетов, полученные для фракционного состава выброса с тремя вариантами m_i , $i=1, \dots, 5$, представленными в таблице. Распределение 1 (m_{i1}) и скорости осаждения V_i для действующего отвала (работа техники и сдувание) взяты из [14], где был проведен литературный обзор немногочисленных экспериментальных исследований дисперсного состава выбросов предприятий угледобычи (в основном для Донецкого бассейна). Однако достаточно очевидно, что фракционный состав существенно зависит от различных факторов (марка угля, прочность породы, интенсивность обработки). Для имитации погрешности в задании дисперсного состава предположим, что количество крупных частиц несколько увеличилось (за период осреднения поверхность отвала интенсивно обрабатывалась горной техникой – распределение 2). В распределении 3, напротив, преобладают мелкие частицы, что возможно в случае, когда основной механизм образования частиц есть ветровое сдувание. При этом суммарный выброс M предполагается неизменным.

На рисунке 4 (слева) можно видеть изолинии расчетного суммарного сухого осаждения пыли (P_c , формула (2)) в окрестности ранее описанного неорганизованного площадного источника с распределением 1. При этом средние концентрации q_i рассчитаны для метеоусловий зимы 2008 – 2009 годов. В правой части рисунка показано влияние изменения распределения выброса по размерам частиц m_i при неизменности других данных по линии на север от центра источника. Нетрудно заметить, что результаты меняются почти в 3 раза.

Проведенные выше расчеты показывают, что для получения достаточно надежных модельных оценок осаждения пылевых частиц в окрестности объектов угледобывающей промышленности необходимо весьма аккуратно подходить к подготовке входных данных.

Изменение повторяемости скоростей ветра достаточно слабо влияет на результаты моделирования.

Для оценки максимально возможного осаждения необходимо выбирать наиболее неблагоприятную розу ветров, причем для каждого направления ветра.

Наибольшее влияние на результаты моделирования оказывает задание дисперсного состава суммарного выброса, для определения которого необходимы экспериментальные исследования. В частности, для неорганизованных источников представляется перспективным восстановление дисперсного состава по данным снегового анализа и краткосрочных замеров суммарного осаждения пыли вдоль линии ветра.

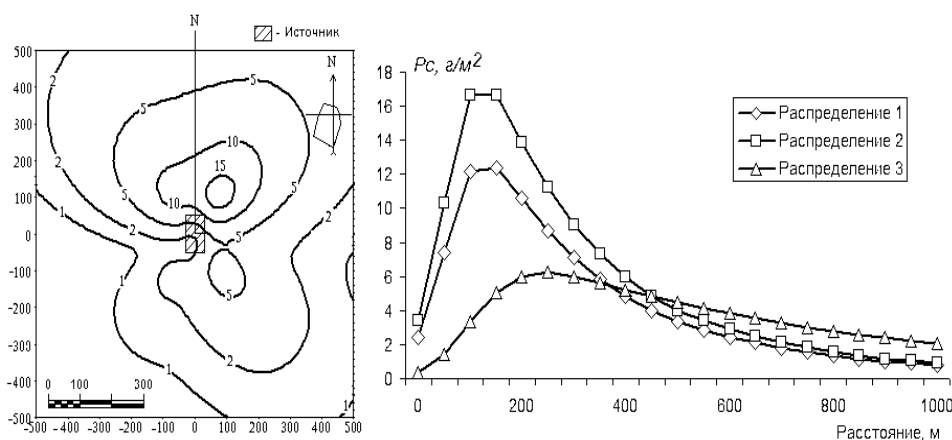


Рис. 4. Изолинии расчетного сухого осаждения P_c (г/м²) за зимний период 2008-2009 в окрестности площадного источника (слева) и влияние дисперсного состава выброса с распределениями из таблицы на результаты расчетов по линии на север (N) от центра источника (справа)

Литература

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред. Ф. Т. М. Ньистадта, Х. Ван-Доба – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 350 с.
2. Программный комплекс “ЭРА” / А. А. Быков, П. А. Безруков, К. Ю. Попенко [и др.] // Экология производства. – 2007. – № 9.
3. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, М. Ю. Климович // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – Т. 10. – № 5.
4. Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, М. Ю. Климович // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2.
5. Быков, А. А. Особенности построения и практического применения локальной модели загрязнений почвы техногенными выбросами пылевых частиц / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 4.
6. Газиев, Я. И. Физико-математическое моделирование процесса аэрального загрязнения почв промышленными дымовыми выбросами в атмосферу и продуктами их физико-химических превращений / Я. И. Газиев, А. К. Соснова // Труды ИЭМ. – Вып. 14(129). – М.: Гидрометеиздат, 1987.
7. Генихович, Е. Л. Определение коэффициента турбулентности по данным стандартных метеорологических наблюдений / Е. Л. Генихович, Г. И. Осипова // Труды ГГО. – Вып. 479. – Л.: Гидрометеиздат, 1984.
8. Оперативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период / Е. Л. Генихович, М. Е. Берлянд, И. Г. Грачева [и др.] // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. – Вып. 549. – СПб.: Гидрометеиздат.
9. Методика экологической экспертизы предпроектных и проектных материалов по охране атмосферного воздуха / Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ. – М., 1995.
10. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. – СПб.: НИИ Атмосфера, 2005. – 211 с.
11. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). – СПб.: ГГО им. А. И. Воейкова, 2005.
12. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 92 с.
13. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду 2.1.10.1920-04. – М., 1994. – 163 с.
14. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 с изменением № 1 СанПиН 2.2.1./2.2.1-2362-08 от 10 апреля 2008 г. № 25. “Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов”. – М., 2008.

Информация об авторах:

Быков Анатолий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-913-123-03-70, bykov@icc.kemsc.ru

Bykov Anatoly Aleksandrovitch – Candidate of Physics and Mathematics, senior researcher at Kemerovo branch of the Institute for Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Счастливцев Евгений Леонидович – доктор технических наук, заведующий лабораторией Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-903-944-52-68, zavlab@icc.kemsc.ru

Schastlivtsev Evgeniy Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Пушкин Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-913-074-99-18, pushkin@icc.kemsc.ru

Pushkin Sergey Grigorievich – Candidate of Technical Sciences, senior researcher at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 519.6:551.511.61

**ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ
ОТ ПЫЛЯЩЕГО НЕОРГАНИЗОВАННОГО ИСТОЧНИКА***А. А. Быков, М. Ю. Захаров, Е. Л. Счастливцев***A METHOD FOR RECONSTRUCTION OF A FUGITIVE SOURCE'S
ATMOSPHERIC DUST EMISSION PARAMETERS***A. A. Bykov, M. Y. Zakharov, E. L. Schastlivsev*

Предлагается метод, показывающий возможность восстановления неизвестного дисперсного состава выброса неорганизованного источника на основе экспериментальных исследований краткосрочного суммарного осаждения пыли на различных расстояниях от источника с параллельной фиксацией метеорологических параметров.

We suggest a method to demonstrate the possibility of reconstructing a fugitive source's unknown powder emission. The method is based on experimental studies of short-term integral dust deposition at different distances from the source with simultaneous observation of stable meteorological parameters.

Ключевые слова: неорганизованный источник, дисперсный состав, выброс в атмосферу.

Keywords: fugitive source, powder, atmospheric emission.

Введение

В настоящее время Кемеровская область является основным угледобывающим регионом России. Концентрация производства на незначительной территории вызывает высокую экологическую нагрузку на природные комплексы, в том числе и на атмосферу. Выбросы угледобывающих предприятий, составляющие четверть суммарного по области выброса, содержат большой процент пылевых частиц, загрязняющих не только атмосферу, но и подстилающую поверхность (почву, снег). Поэтому, как научный интерес, так и практическую значимость представляет экспериментальная оценка выпадения и накопления пылевых выбросов на сельскохозяйственных землях, в снеговом покрове, в бассейнах рек и т. д.

Для проведения количественной оценки осаждения твердых частиц на заданную территорию авторами разработана и доведена до практического использования локальная модель расчета суммарного потока пылевых частиц промышленного происхождения на подстилающую поверхность за длительный (год, сезон) промежуток времени [1, с. 563 – 573]. Рассмотрение особенностей построения модели и ее информационного обеспечения [2, с. 74 – 82] показывает, что одной из весьма значимых причин возникновения существенных погрешностей при расчетах является отсутствие информации о дисперсном составе выбросов таких характерных для угледобычи неорганизованных источников как перегрузка угля, работа горной техники, отсыпка и пыление отвалов.

Кратко рассмотрим основные свойства отвалов как источников выброса в атмосферу пылевых частиц.

Причиной образования отвалов при разработке угольных месторождений является удаление больших масс покрывающих и вмещающих пород, годовые объемы которых в несколько раз превышают объемы добываемого угля. Породы, поступающие в отвал, образуются за счет проходки выработок, их ремонта и восстановления. В литологическом отношении отвалы представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, углем и другими породами. В них присутствуют древесина, металлические предметы. Породы неоднородны по гранулометрическому составу, имеют размер от глинистых частиц до глыб. В зависимости от технологии отвалообразования формируются отвалы следующих типов: конические (терриконы), хребтовые и плоские. Отвалы принимают породу от отдельной шахты, разреза, обогатительной фабрики или от группы угольных предприятий. Основными производственными процессами, генерирующими выбросы пылевых частиц, являются: выгрузка из самосвалов, формирование отвала бульдозерами и ветровое сдувание. Таким образом, любой отвал является источником пылевых частиц различного химического и дисперсного состава. Естественно, в случае самовозгорания отвал выбрасывает и газообразные примеси, которые не влияют на процессы осаждения и в данной работе не рассматриваются. На предприятиях Кузбасса характерный горизонтальный размер пылящих отвалов и складов угля изменяется от 30 до 500 метров, а высота – от 5 до 60 метров.

Важной информацией, как для расчета выброса, так и для расчета дальнейшего загрязнения атмосферы и почвы являются геометрические размеры отвала, состав проводимых на нем работ, влажность материала и т. д. Вся эта информация позволяет оценить суммарный (без детализации по дисперсному составу) выброс пылевых частиц с поверхности отвала на основе методики [3], используемой для проектных работ. Ранее уже отмечалось, что результаты расчета осаждения существенно зависят от корректного задания

параметров источника, одним из которых является дисперсный состав выбрасываемых пылевых частиц, не рассматриваемый в методике [3].

Для точечного организованного источника (труба) получить данный состав можно путем отбора частиц на выходе из трубы с последующим их анализом на распределение по размерам. Однако для неорганизованных источников значительных размеров, к которым относятся отвалы, такое измерение является весьма трудоемким и не вполне определенным. Поэтому в данной работе предлагается рассмотреть возможность восстановления неизвестного дисперсного состава неорганизованного выброса на основе экспериментальных исследований краткосрочного суммарного осаждения пыли на различных расстояниях от источника с параллельной фиксацией метеорологических параметров. Очевидно, что для этого, прежде всего, необходима модель расчета осаждения за небольшой интервал времени, порядка 1 часа. Такая модель позволит провести решение вариационной задачи по выбору параметров выброса, обеспечивающих наилучшее соответствие расчета с данными наблюдений. Большое число необходимых для этого вычислений требует разработки эффективной вычислительной схемы и ее программной реализации.

Модель

Рассмотрим модель отвала, которая в простейшем варианте будет выглядеть так, как представлено на рисунке.1, где: H – высота всего отвала (м); U – скорость ветра (м/с); Cl – класс устойчивости атмосферы по схеме Пасквилла [4]. Предположим, что на различных удалениях с подветренной стороны от отвала вдоль направления ветра установлено N планшетов, на которые в течение интервала времени T (порядка часа) оседала пыль, выбрасываемая с поверхности отвала. Путем простого взвешивания определено суммарное осаждение частиц всех фракций на каждый планшет. В итоге получаем следующую формализованную задачу.

В точках на расстояниях $X_1, X_2, \dots, X_M$ (м) вдоль оси факела с подветренной стороны от источника с известным выбросом Q (г/сек) известны суммарные осаждения пыли $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_M$ (г/м²). При этом предполагается, что для всего времени T (сек) проведения эксперимента метеорологические параметры, которые определяют процесс переноса примеси, остаются неизменными (тем самым обеспечиваются условия стационарности). Для временных интервалов порядка часа и менее такое предположение вполне оправданно.

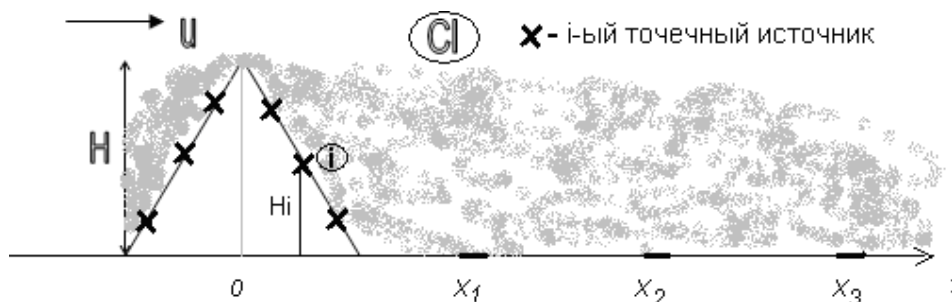


Рис. 1. Схематическое сечение отвала вертикальной плоскостью вдоль направления ветра

Простейшей краткосрочной стационарной моделью, позволяющей количественно описать процесс распространения и осаждения пылевых частиц в зависимости от параметров источника и метеорологических условий, является модель Гауссовского факела [4, 5]. Как неоднократно отмечалось в литературе, применительно к расчету осаждения частиц она удовлетворительно работает на незначительных удалениях от источника, что в нашем случае соблюдается.

Как показано в [6], если точечный источник выбрасывает в атмосферу Q (г/сек) пылевых частиц одинаковой плотности, аэродинамического диаметра и, следовательно, скорости оседания V (м/сек), то расчетное выпадение ϖ (г/м²) таких частиц на расстоянии X (м) за время T (сек) на подстилающую поверхность можно рассчитать на основе соотношения, которое в дальнейшем удобно представить в виде:

$$\varpi = T \times Q \times F(H, X, U, \sigma_y, \sigma_z, V), \quad (1)$$

где: H – высота выброса (м); U – скорость ветра (м/сек); σ_y, σ_z – дисперсионные коэффициенты, зависящие от класса устойчивости атмосферы и определяющие интенсивность турбулентного перемешивания в поперечном ветру направлении по горизонтали и вертикали [4]. Функция F задается выражением:

$$F = \frac{V}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H - \left(\frac{XV}{U} \right)}{\sigma_z} \right)^2 \right], \quad (2)$$

а зависимость коэффициентов σ_y, σ_z от расстояния X и класса устойчивости атмосферы можно найти в [4, 5].

Представим поверхность нашего неорганизованного источника в виде совокупности из N областей, каждая из которых имеет одинаковую площадь. Заменим каждую i -ю область точечным источником с номером i , который выбрасывает в атмосферу $Q_i (i=1, \dots, N)$ пылевых частиц с долевым фракционным составом

$P_j (j=1, \dots, K)$, где K – число фракций, а $\sum_{j=1}^K P_j = 1$. Тем самым выброс j -ой фракции от i -го

источника составляет $Q_{ij} = Q_i \times P_j$. При этом j -я фракция обладает скоростью оседания V_j . В соответствии с (1) получим в любой точке на расстоянии X_i от i -го условного точечного источника (заменяющего i -ю область) суммарное по фракциям осаждение на поверхность

$$\varpi_i = T \times \sum_{j=1}^K (Q_i \times P_j \times F(H_i, X_i, U, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}, V_j)) = T \times Q_i \times \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_i, V_j) \quad (3)$$

В предположении единого фракционного состава и однородности выброса со всей поверхности отвала получим на расстоянии X от точки θ (рис.1) суммарное выпадение Ω_{Xc} (г/м²) от всего отвала (X_i – расстояние от i -го точечного источника до точки с координатой X):

$$\Omega_{Xc} = \sum_{i=1}^N \varpi_i = T \times \sum_{i=1}^N Q_i \times \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_{Ci}, V_j) = T \times Q \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_{Ci}, V_j). \quad (4)$$

Поскольку геометрия отвала и его разбиение на точечные источники предполагается известным, то известны все N_i и X_i . Известны определяющие метеоусловия (скорость ветра U и класс устойчивости Cl), а, следовательно, и диффузионные параметры σ_{yi}, σ_{zi} для каждого точечного источника. Суммарный выброс всего отвала Q можно ориентировочно получить на основе методики [3].

Используя (4), суммарное выпадение для каждой экспериментальной точки X_m ($m=1, \dots, M$) можно представить в следующем виде:

$$\Omega_{X_{CN}} = P_1 \times T \times Q \times \sum_{i=1}^N F_{i1}(X_{Ci}, V_1, H_{Ci}, U) + \dots + P_K \times T \times Q \times \sum_{i=1}^N F_{iK}(X_{Ci}, V_K, H_{Ci}, U). \quad (5)$$

Заметим, что все параметры коэффициента $T \times Q \times \sum_{i=1}^N F_{iK}(X_{Ci}, V_K, H_{Ci}, U)$ нам известны и тогда мы получаем систему линейных уравнений (далее СЛАУ) следующего вида:

$$\begin{aligned} \Omega_{X_{C1}} &= P_1 \times K_{11} + \dots + P_K \times K_{1K} \\ &\dots \\ \Omega_{X_{CN}} &= P_1 \times K_{N1} + \dots + P_K \times K_{NK}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $K_{ij} = T \times Q \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K F_{ij}(X_{Ci}, V_j, H_{Ci}, U)$.

Данную систему линейных уравнений уже можно представить в матричной форме, вида:

$$Au = f, \quad (7)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} K_{11} & \dots & K_{1K} \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{N1} & \dots & K_{NK} \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_K \end{pmatrix}, f = \begin{pmatrix} \Omega_{X_{C1}} \\ \dots \\ \Omega_{X_{CN}} \end{pmatrix}.$$

Легко заметить, что число строк матрицы A соответствует числу экспериментальных точек M , а число столбцов – числу фракций K . Отметим, что если $M < K$, т. е. количество уравнений меньше числа неизвестных, то система получается недоопределенной и решений может быть много. Если $M > K$, т. е. количество уравнений больше числа неизвестных, то система переопределена и решений может не быть вообще. Если $M = K$, то при $\det A = 0$, решений может быть как бесконечно много, так и не быть вообще. Если $\det A \neq 0$, то существует только единственное решение.

Матрица A может быть как незнакоопределенная, особенная или почти особенная ($\det A \approx 10^{-20} - 10^{-30}$). Следовательно, необходимо использовать такую итерационную схему, которая была бы сходящейся, независимо от свойств матрицы A .

В [8] рассматриваются итерационные схемы неполной аппроксимации, для которых доказана сходимость для незнакоопределенных и почти особенных матриц. Если матрица A является особенной, то для решения можно использовать следующую итерационную схему

$$u^{n+1} = u^n - \alpha_{n+1} z^n. \quad (8)$$

Можно показать, что если $z^n \notin \ker A$ и $u^0 = A\varphi, \varphi \in H$ - произвольный вектор, то u^n сходится к нормальному решению нашей системы.

Численный расчет

Для проверки работоспособности модели, возьмем ориентировочные данные, имитирующие экспериментальные исследования по осаждению пыли в пяти точках на расстоянии 50, 100, 150, 200, 250 метров от отвала с максимальной высотой $H=12$ м и шириной сечения 20 м (рис. 1). Длина отвала, т. е. его горизонтальный размер, перпендикулярный плоскости рисунка 1, составляет 100 м. Предположим, что в момент проведения эксперимента скорость ветра была 1 м/сек при классе устойчивости атмосферы D . В течение часа суммарное осаждение пыли составило $\Omega_1=0.6$, $\Omega_2=0.7$, $\Omega_3=0.4$, $\Omega_4=0.4$, $\Omega_5=0.4$ (все в г/м²). Ориентировочный суммарный выброс пыли Q со всей поверхности отвала при данной скорости ветра в соответствие с методикой [3] составляет при работе на отвале техники и ветровом сдувании 8 г/сек.

Допустим, что число фракций $K = 5$ и воспользуемся таблицей из [1] для скоростей осаждения V_j . Дисперсный состав будем считать неизвестным, хотя его ориентировочное начальное значение можно оценить по литературным данным [7].

Таблица 1

Параметры удаления частиц из атмосферы на подстилающую поверхность

Класс по размеру	Диаметр частиц, мкм	Доля фракции в выбросе, P_j	Скорость осаждения на снег, V_p , м/с	Скорость осаждения на почву, V_p , м/с
1. Очень мелкие	<1	P_1	0.001	0.002
2. Мелкие	1-10	P_2	0.007	0.013
3. Средние	10-50	P_3	0.042	0.043
4. Крупные	50-100	P_4	0.151	0.155
5. Очень крупные	>100	P_5	0.420	0.430

Разобьем поверхность отвала на 6 точечных источников, отвечающих за участки отвала с одинаковой площадью, и сконцентрируем в них выброс по всей 100-метровой длине отвала. В предположении равномерности выброса с единицы площади получим для каждого из 6-и источников суммарный выброс $Q_i = 1.333$ г/сек.

Начальное разбиение по дисперсному составу P_{jl} возьмем на основании литературных данных, приведенных в [5], учитывая, что выделение пыли на действующем отвале обусловлено такими процессами, как выгрузка, формирование и сдувание.

Разбиение выброса каждого из 6-и источников по фракционному составу фактически означает то, что каждый из этих источников превращается в 5 самостоятельных действующих, но выбрасывающих частицы только одного из пяти приведенных в таблице 1 размеров.

Таблица 2

Начальное разбиение суммарного выброса по фракциям

Номер фракции j , (таб. 1)	1	2	3	4	5
Начальный состав, P_{jl}	0.2	0.37	0.2	0.15	0.08
Выброс $Q_{ijl}=Q_{ipjl}$, г/сек	0.32	0.592	0.32	0.24	0.128

Ниже представлен результат, полученный в результате расчета в написанной программе.

Таблица 3

СЛАУ для нахождения доли фракций P_j

$X_m, м$	Скорость осаждения, $V_p, м/с$				
	0.001	0.007	0.042	0.151	0.42
50	0.0001364456	0.0009839609	0.0069089814	0.036485250	0.140850191
100	0/0000677387	0/0004839190	0.0032396138	0.014899939	0.045319076
150	0.0000412917	0/0002944423	0.0019467192	0.008425663	0.018077469
200	0/0000279032	0/0001985948	0.0012961175	0.005270411	0.008224755
250	0/0000201027	0/0001428403	0.0009217855	0.003552129	0.004268615

Таблица 4

Восстановленное разбиение суммарного выброса по фракциям

Номер фракции j , (таб. 1)	1	2	3	4	5
Оптимальный состав, P_{jo}	0.49975	0.270041	0.199	0.02	0.0099

Определитель нашей матрицы равен $1.41 \cdot 10^{-23}$, что говорит о плохой обусловленности матрицы. Таким образом, решение нашей системы линейных уравнений оказывается неустойчивым.

Применяя к нашей системе метод минимальных невязок, мы получаем решение P_{jo} , приведенное в таблице 4. Полученное решение можно назвать оптимальным, поскольку оно характеризует распределение по размерам частиц суммарного выброса пыли, при котором кривая расчетного осаждения наиболее близко проходит к экспериментальным точкам.

Заключение

Исходя из приведенного численного расчета, можно сказать, что определив экспериментально суммарное количество выпавших пылевых частиц в нескольких точках по ветру от источника, действительно можно определить такой дисперсный состав выброса, при котором расчетные данные будут отличаться от экспериментальных с допустимым для практики отклонением. Привлечение физического смысла процесса осаждения позволяет достаточно надежно выбрать направление поиска оптимального решения.

Таким образом, предлагаемая модель представляется вполне работоспособной и готовой для усвоения данных эксперимента, который планируется провести в окрестности одного из отвалов в 2012 году.

Литература

1. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, М. Ю. Климович // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – Т. 10. – № 5.
2. Быков, А. А. Особенности построения и практического применения локальной модели загрязнений почвы техногенными выбросами пылевых частиц / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 4.
3. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. – Пермь: МНИИЭКО ТЭК, 2003. – 116 с.
4. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред. Ньистадта Ф. Т. М., Ван-Дона Х. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 350 с.
5. Сравнительный анализ некоторых математических моделей для процессов распространения загрязнений в атмосфере / И. В. Белов, М. С. Беспалов, Л. В. Клочкова [и др.] // Математическое моделирование. – 1999. – Т. 11. – № 7.
6. Kenneth, Wark, Cecil F. Warner. Air Pollution. Its Origin and Control. A Dun-Donnelley Publisher. – New York, 1976.
7. Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона / А. А. Быков, Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, О. В. Смирнова // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2.
8. Захаров, Ю. Н. Итерационные методы решений систем линейных алгебраических уравнений: учеб. пособие / Ю. Н. Захаров. – Кемерово: КемГУ, 2011.

Информация об авторах:

Быков Анатолий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-913-123-03-70, bykov@icc.kemsc.ru

Bykov Anatoly Aleksandrovitch – Candidate of Physics and Mathematics, senior researcher at Kemerovo branch of the Institute for Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Захаров Максим Юрьевич – аспирант Институт вычислительных технологий СО РАН, zakharovmaxim@mail.ru

Zakharov Maksim Yurievich – post-graduate student at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Счастливцев Евгений Леонидович – доктор технических наук, заведующий лабораторией Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-903-944-52-68, zavlab@icc.kemsc.ru

Schastlivtsev Evgeniy Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 004.42

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОРГАНИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПАРАДИГМЫ МОДУЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

И. В. Бычков, Г. А. Опарин, А. П. Новопашин, И. А. Сидоров, С. А. Горский

METHODS AND TOOLS FOR PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTING BASED ON MODULAR PROGRAMMING PARADIGM

I. V. Bychkov, G. A. Oparin, A. P. Novopashin, I. A. Sidorov, S. A. Gorskiy

В работе представлена базовая модель планирования параллельных и распределенных крупноблочных вычислений и реализованные на ее основе инструментальные средства разработки параллельных и распределенных пакетов прикладных программ.

In this work the basic model of planning coarse-grained computations is provided. The tools for developing parallel and distributed software packages, implemented on this model, are presented.

Ключевые слова: параллельные и распределенные вычисления, пакеты прикладных программ, планирование вычислений, модульное программирование.

Keywords: parallel and distributed computing, software packages, planning algorithms, modular programming.

Введение

Происходящее в последнее десятилетие широкомасштабное внедрение в практику расчетных работ параллельной вычислительной техники (в особенности кластерных архитектур) способствует возрождению интереса к пакетной проблематике, что влечет, в свою очередь, необходимость реконструкции старых и создания новых методов и средств организации параллельных и распределенных вычислений с использованием пакетов прикладных программ (ППП).

В качестве самостоятельного научного направления пакетная проблематика сложилась в 70 – 80-х годах прошлого столетия. Если первые ППП представляли собой простые тематические подборки программ для решения отдельных задач в той или иной предметной области, то современные ППП являются сложными программными комплексами, включающими: прикладное программное обеспечение (функциональное наполнение) пакета в виде библиотеки прикладных программных модулей; системное программное обеспечение для организации решения пользовательских задач с использованием функционального наполнения, включающее средства автоматизации планирования вычислений (в том числе параллельных и распределенных); специализированные языковые средства описания предметной области и постановки пользовательских задач.

Изначальная ориентация и настройка на широкий класс задач предметной области, в которой работает прикладной специалист, является одной из ключевых особенностей ППП. Сочетание в одном пакете множества разнообразных моделей и алгоритмов достигается путем использования принципа модульной организации функционального наполнения пакета. Входящий в состав ППП модуль представляется, как правило, в виде автономной программной единицы, написанной на традиционном языке программирования и обеспечивающей решение некоторой подзадачи. Предполагается, что взаимодействие модулей осуществляется только на уровне их входных и выходных параметров. Использование принципа модульности позволяет заменить написание программы (в традиционном понимании) ее конструированием из готовых программных блоков крупного размера. Расширение класса задач, решаемых пакетом, может достигаться за счет подключения к ППП вновь создаваемых модулей.

В настоящее время серьезное внимание уделяется проблеме создания, так называемых, интеллектуальных ППП, позволяющих конечному пользователю формулировать свою задачу в содержательных терминах без указания алгоритма ее решения. Синтез схемы решения и сборка целевой программы производятся автоматически, при этом детали вычислений остаются скрытыми от пользователя. Такой способ организации вычислений, берущий свое начало в работах Э. Х. Тыугу [1, с. 3 – 13], С. С. Лаврова [2, с. 29 – 41], Г. А. Опарина [3, с. 130 – 160] и других, известен как концептуальное (структурное, сборочное) программирование. Он предполагает наличие вычислительной модели (схемы) предметной области, позволяющей описывать вычислительные возможности ППП для решения задач определенного класса. Такую вычислительную модель можно определить как совокупность значимых величин (параметров) предметной области и функциональных отношений между ними. Таким образом, вычислительная модель, по сути, определяет правила применения и сочетания модулей в процессе решения задачи и позволяет автоматически осуществлять планирование вычислений по непроцедурной постановке задачи вида: "по заданным значениям параметров $x_1, x_2, \dots, x_k$ вычислить значения параметров $y_1, y_2, \dots, y_r$ ".

Большое разнообразие разработанного прикладного программного обеспечения требует создания универсальных (изначально не привязанных к конкретной предметной области) инструментальных средств, позволяющих с наименьшими трудозатратами объединять имеющийся программный код в рамках одного ППП. Кроме этого, такой инструментарий должен обеспечивать корректность и отказоустойчивость вычислений в рамках ППП, эффективность использования функционального наполнения пакета, высокий уровень интеллектуализации с учетом современных требований, включая автоматизацию процессов выявления внутреннего параллелизма вычислительной модели, синтеза параллельных планов решения задач и генерации на основе этих планов параллельных прикладных программ для различных вычислительных архитектур. В настоящее время наблюдается дефицит инструментальных средств, обладающих перечисленными характеристиками.

Следующие разделы статьи посвящены описанию базовой вычислительной модели планирования параллельных и распределенных вычислений и использующих эту модель инструментальных средств разработки параллельных и распределенных пакетов прикладных программ. Распределенные вычислительные системы, организованные с помощью рассматриваемых в работе инструментальных средств [4, с. 69 – 82], являются частным случаем GRID-систем.

Базовая модель планирования вычислений

В качестве базы знаний планировщика используется структура $KB=(F, Z, T, Y, In, Out, Com)$,

где:

$F = \{F_1, \dots, F_n\}$ – множество имен программных модулей, реализующих операции предметной области;

$Z = \{Z_1, \dots, Z_m\}$ – множество имен параметров (значимых величин) предметной области, являющихся входными или выходными параметрами модулей из F ; с каждым модулем F_i связано два множества параметров $A_i, B_i \subset Z$, называемых соответственно входом и выходом;

$T = \{T_1, \dots, T_r\}$ – множество типов параметров;

$Y = \{Y_1, \dots, Y_p\}$ – множество узлов вычислительной системы (ВС);

$In \subset F \times Z, Out \subset F \times Z$ – отношения, отражающие взаимосвязь модулей с данными соответственно по входу и выходу;

$Com \subset F \times Y$ – отношение, определяющее статические связи между программными модулями и узлами ВС.

Предполагается, что база знаний KB обладает высоким уровнем внутреннего параллелизма и является избыточной в том смысле, что для решения задачи вычисления требуемого набора целевых параметров B_0 по заданному множеству параметров - исходных данных A_0 используется только часть модулей из F , и/или эта задача имеет несколько альтернативных планов решения.

Отношения In, Out и Com представлены в виде трех булевых матриц A, B и C размерности $n \times m, n \times m$ и $n \times p$ соответственно. Элементы матриц формируются следующим образом: $a_{ij}=1$ ($b_{ij}=1$), если параметр Z_j является входным (выходным) для модуля F_i ; $c_{ij}=1$, если модуль F_i установлен в узле Y_j . Строки и столбцы матриц A, B и C являются двоичным представлением соответствующих подмножеств множеств F, Z и Y , связанных отношениями In, Out и Com .

План вычислений представляется в виде матрицы $X k \times n$ булевых переменных x_{ij} . Значение x_{ij} , равное единице, означает, что программный модуль F_j выполняется на t -м шаге плана X , где $t \in N = \{1, 2, \dots\}$ играет роль дискретного времени. Общая длина плана равна k , его строка задает множество параллельно исполняемых модулей, а столбцы соответствуют множеству модулей F .

Информационно-логические связи между параметрами и модулями, входящими в план, можно представить в виде двудольного ориентированного графа, включающего два непересекающихся множества вершин (рис. 1): множество вершин-параметров и множество вершин-модулей.

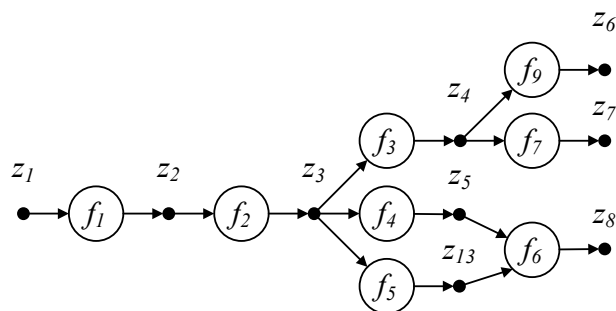


Рис. 1. Пример двудольного ориентированного графа, отражающего информационно-логические зависимости между параметрами и модулями ППП

К значениям элементов матрицы X предъявляются ограничения, которые записываются в форме булевых уравнений и представляют собой требования к искомому параллельному плану, синтезируемому в процессе решения системы таких уравнений. К числу обязательных требований относятся следующие:

- 1) допустимость (модули в плане должны быть упорядочены таким образом, чтобы каждый из них к моменту своего запуска был обеспечен необходимыми входными данными);
- 2) неповторность (каждый модуль может включаться в план не более одного раза);
- 3) неизбыточность (исключение любого модуля из плана приводит к недопустимому плану);
- 4) оптимальность (длина плана должна быть равна заданной величине k).

Кроме обязательных требований, при необходимости могут быть сформулированы и добавлены в общую систему ограничений дополнительные условия, позволяющие при построении плана учитывать временные задержки, связанные с исполнением программных модулей, ресурсные ограничения ВС (число узлов или процессоров), привязку модулей к узлам ВС, требование синхронности запуска модулей и другие ограничения. В [5] для большинства из перечисленных ограничений получены формулировки в виде булевых уравнений.

Преимущества такого подхода к планированию крупноблочных вычислений, при котором условия задачи формулируются в виде системы булевых уравнений (ограничений), а искомый план исполнения модулей является ее решением, состоят в том, что он позволяет, во-первых, получать параллельные планы требуемой длины, во-вторых, учитывать разнообразные ограничения, предъявляемые к плану, и, наконец, в-третьих, использовать существующие эффективные решатели булевых уравнений (или SAT-решатели), которые в ряде случаев обгоняют по быстродействию специализированные алгоритмы планирования.

С практической точки зрения можно выделить два типовых подхода к организации функционального наполнения пакета и распределения модулей по узлам ВС:

1. Все вычислительные модули содержатся в единой библиотеке, установленной на рабочей станции разработчика пакета. По непроцедурной постановке задачи производится автоматическое планирование параллельной схемы вычислений (с соблюдением установленных ограничений). В соответствии с полученной схемой осуществляется синтез целевой параллельной программы, ее компиляция и запуск на заданном числе узлов однородной ВС.

2. Вычислительные модули размещаются в узлах ВС, отличающихся программно-аппаратными характеристиками, что накладывает дополнительные требования к организации функционального наполнения ППП. При этом часть модулей может быть неотчуждаема от владельцев узлов, допускается множественность установки модулей в узлах ВС. Постановка задач осуществляется в процедурном виде, а исполнение построенных схем решения выполняется в режиме интерпретации.

Далее в статье рассматриваются инструментальные средства, реализующие описанные подходы к организации функционального наполнения параллельных и распределенных пакетов прикладных программ.

Инструментальный комплекс (ИК) ORLANDO

Данный инструментальный ориентирован на создание ППП для однородных UNIX-кластеров с возможностью автоматической генерации параллельных программ для решения вычислительных задач в виде композиции готовых функциональных блоков. На рис. 2 представлена архитектура ИК ORLANDO.

Высокоуровневый язык ORLANDO [6] предоставляет средства для описания объектов предметной области (параметров и операций), отношений между ними и обеспечивает на основе этих описаний постановку вычислительных задач в непроцедурном виде. Конструкции языка носят исключительно описательный (декларативный) характер и не предполагают указания порядка исполнения модулей, участвующих в решении задачи. Все информационно-логические связи между модулями выявляются на этапе трансляции описания предметной области.

Текстовый редактор предоставляет пользователю набор функций, необходимых для быстрого и удобного формирования описания предметной области и постановок задач с использованием языковых конструкций ORLANDO, а также функций для взаимодействия с другими компонентами инструментального комплекса – транслятором, подсистемами компиляции и запуска, базой расчетных данных.

Синтаксический анализатор осуществляет разбор описания предметной области на языке ORLANDO, проверку корректности и целостности такого описания и его перевод во внутреннее представление системы планирования.

Планировщик, реализованный в соответствии с рассмотренной выше базовой моделью планирования, строит по непроцедурной постановке задачи с учетом имеющихся ограничений параллельный (в общем случае) план ее решения в виде частично-упорядоченного набора имен вычислительных модулей из функционального наполнения пакета.

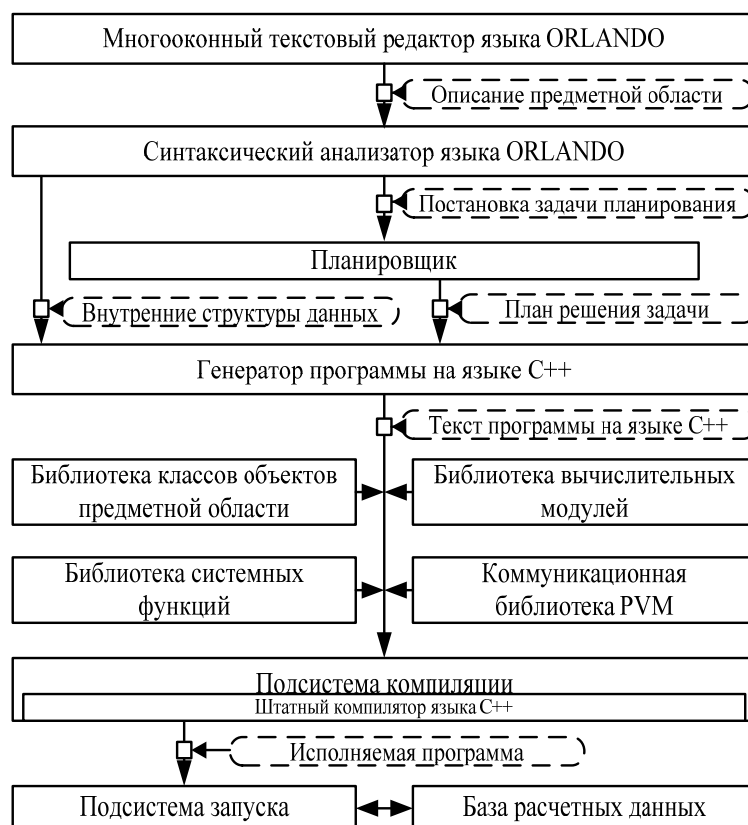


Рис. 2. Архитектура ИК ORLANDO

Полученная таким образом абстрактная программа с использованием генератора преобразуется в программу на языке C++, состоящую из двух частей – управляющей и вычислительной. Управляющая часть программы оформляется в виде управляющего (головного) модуля, отвечающего за исполнение построенного параллельного плана решения задачи. Управляющий модуль реализует следующие функции: ввод (вывод) значений входных (выходных) параметров, хранение значений параметров в процессе вычислений, хранение информации о ходе вычислений, запуск отдельных вычислительных модулей на исполнение с использованием возможностей коммуникационной библиотеки PVM. Вычислительная часть программы формируется из оберточных модулей. Для каждого вычислительного модуля, входящего в план решения задачи, создаются специальные программы-обертки, отвечающие за прием значений входных параметров от управляющего модуля, вызов соответствующей подпрограммы из функционального наполнения ППП, отсылку полученных значений выходных параметров управляющему модулю.

Подсистема компиляции параллельных программ выполняет следующие основные функции: обеспечивает подключение пользователя к вычислительному кластеру, копирует исходные файлы программ на языке C++ в пользовательский директорию на управляющем узле кластера, производит компиляцию главной программы и вспомогательных модулей с использованием штатных средств компилятора языка C++ (в случае возникновения ошибок выводятся соответствующие сообщения). Для компиляции используются следующие библиотеки: библиотека классов языка C++ для программной реализации объектов предметной области; библиотека системных функций управляющего модуля; библиотека вычислительных модулей, представляющая собой функциональное наполнение ППП; коммуникационная библиотека PVM.

Подсистема запуска параллельных программ копирует файлы с наборами исходных данных, осуществляет запуск программы на целевом кластере, производит мониторинг работы программы пользователя, по завершении вычислений копирует файлы, содержащие значения целевых параметров в базу расчетных данных. Главной особенностью такой базы является возможность хранения результатов по вариантам вычислительных экспериментов.

Порядок работы ИК ORLANDO предполагает, что на начальном этапе пользователь формирует описание предметной области, используя выразительные средства языка ORLANDO. Далее он приступает к решению задачи, формулируя ее в непроцедурной форме “исходные параметры $\Rightarrow$ цель расчета” в виде указания планировщику. Построенный планировщиком параллельный план решения задачи на этапе трансляции преобразуется в параллельную программу на языке C++, после чего готовая параллельная программа перемещается на целевой вычислительный кластер, где компилируется штатными средствами. С помощью подсистемы запуска из базы расчетных данных на кластер копируются необходимые исходные данные, и осуществляется запуск программы на счет.

Инструментальный комплекс DISCOMP

Инструментальный комплекс DISCOMP предназначен для поддержки основных этапов разработки и применения распределенных пакетов прикладных программ (РППП), ориентированных на работу в гетерогенной (многоплатформенной) распределенной вычислительной среде (РВС), которая может включать вычислительные кластеры различных конфигураций. Вычислительные модули, составляющие функциональное наполнение РППП, представляют собой исполняемые программы, которые могут быть реализованы на различных языках программирования (например, C, Fortran, Pascal и др.) и быть платформозависимыми. Допускается включение в состав функционального наполнения РППП нетиражируемых программных комплексов, размещенных в строго определенных узлах РВС, а также унаследованного программного обеспечения, переставшего соответствовать современным требованиям, но до сих пор эксплуатируемого в связи с трудоемкостью его модификации или замены. Удаленный запуск модулей, обмен данными между модулями через файлы и мониторинг узлов РВС реализуются средствами системной части РППП.

Постановка содержательной задачи для структуры КВ задается пользователем пакета в процедурном виде и в общем случае формулируется следующим образом: “зная KB выполнить Q ”, где Q представляет собой частично упорядоченную последовательность модулей $Q_i \in F$. В процессе установления частичного порядка множество Q разбивается на k непустых подмножеств. Упорядочение подмножеств осуществляется по степени готовности модулей к исполнению. В рамках каждого подмножества входящие в него модули могут выполняться независимо друг от друга в любой последовательности или параллельно.

Под схемой решения задачи (СРЗ) в ИК DISCOMP понимается модель крупноблочной программы, отражающая информационно-логическую структуру вычислений в терминах предметной области. СРЗ строится автоматически в параллельно-ярусной форме из элементов следующих множеств: множества параметров Z ; множества модулей F ; множества событий E , возникающих в процессе выполнения СРЗ; множества операций H , предназначенных для управления процессом выполнения СРЗ; множества специальных операторов $O = \{START, STOP, READ \langle \text{список параметров} \rangle, WRITE \langle \text{список параметров} \rangle, CALL \langle \text{имя модуля} \rangle, FORK, JOIN, TERMINATE \langle \text{список модулей} \rangle\}$.

Построение СРЗ осуществляется в два этапа:

I. Разработчик РППП формирует ярусы СРЗ, размещает на этих ярусах модули из F и определяет события из E , при возникновении которых необходимо выполнить те или иные управляющие функции из H .

II. Транслятор постановки задачи на основе информационно-логических связей между параметрами и модулями структуры КВ определяет множества входных параметров A_0 и целевых параметров B_0 СРЗ, выполняет проверку необходимых ограничений (допустимость, неповторность, неизбыточность) и дополняет постановку задачи специальными операторами из O .

Выполнение СРЗ в режиме интерпретации представляет собой процесс параллельно-последовательного выполнения ее операторов в соответствии с порядком их вхождения в управляющий граф (рис. 3), вершинами которого являются операторы вызова модулей (или их экземпляров) из F , а также специальные операторы. Передача данных (значений параметров) между модулями выполняется в соответствии с информационным графом (рис. 4).

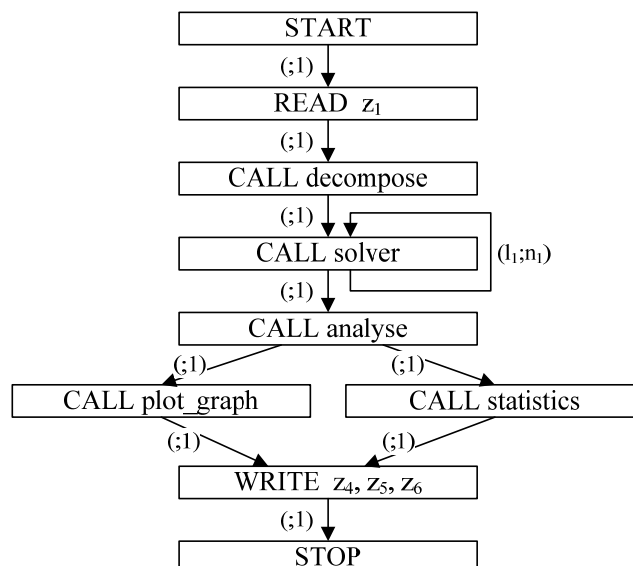


Рис. 3. Пример управляющего графа CPЗ

К основным составляющим программно-аппаратной архитектуры инструментального комплекса DISCOMP относятся: система управления PBC, набор вычислительных клиентов PBC, система хранения данных и средства доступа пользователей к РППП. Схема взаимодействия основных компонентов представлена на рис. 5.

Система управления PBC (серверная часть ИК DISCOMP) поддерживает взаимодействие с подсистемами хранения данных и доступа пользователей к пакету, а также обеспечивает централизованное управление узлами PBC. Серверная часть ИК DISCOMP включает системное ядро, менеджеры вычислительных процессов и ресурсов, диспетчер очереди задач, подсистему журнализации и исполнительную подсистему.

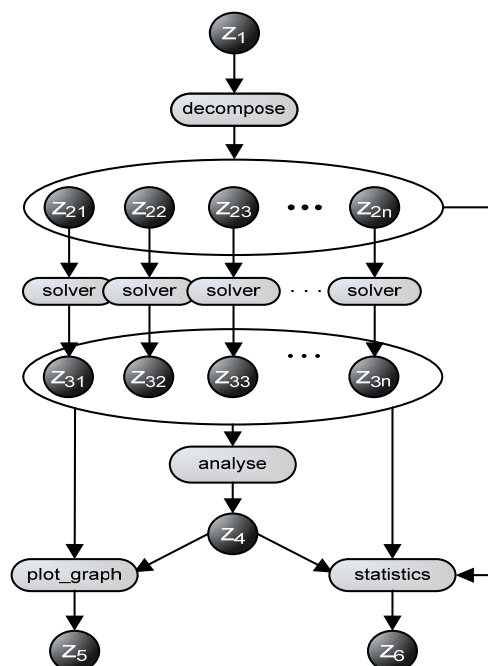


Рис. 4. Пример информационного графа CPЗ

Вычислительный клиент реализует процесс выполнения модуля в узле PBC и осуществляет следующие функции: организацию соответствующей среды для работы модуля (создание временных директорий, файлов входных и выходных параметров модулей, задание значений переменных окружения, перенаправление ввода/вывода и т. д.); получение значений входных параметров модуля из управляющего узла; запуск модуля; контроль процесса его выполнения; отсылку значений выходных параметров в управляющий узел после завершения работы модуля.

Система хранения данных используется для структурированного размещения описаний предметной области, постановок задач в формате XML и расчетных данных в виде файлов, а также для предоставле-

ния доступа к ним из различных подсистем ИК DISCOMP. Синхронизация процессов чтения/записи данных осуществляется посредством файловых блокировок.

Средства доступа пользователей к РППП обеспечивают взаимодействие пользователя с пакетом, управление вычислительными процессами, ввод данных, получение результатов вычислений. ИК DISCOMP предоставляет два способа взаимодействия пользователя с РППП: с помощью набора утилит командной строки и посредством интерактивного пользовательского web-интерфейса.

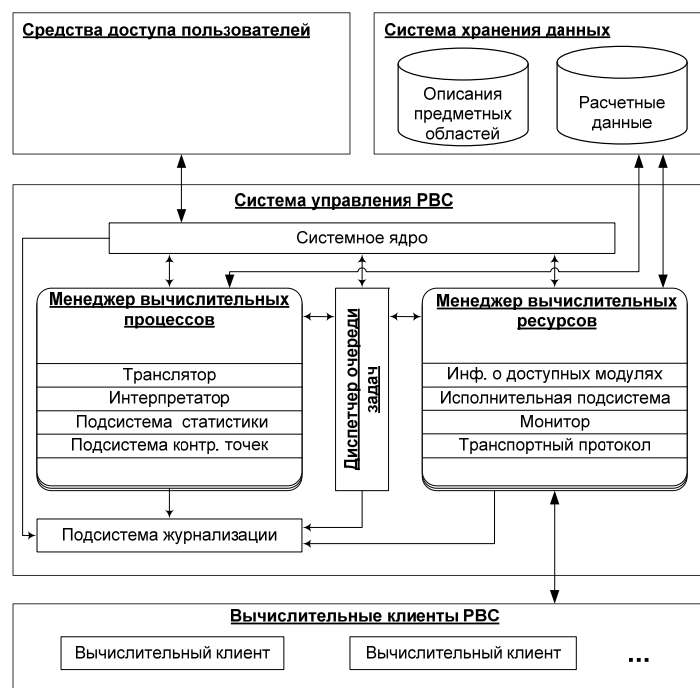


Рис. 5. Схема взаимодействия основных компонентов ИК DISCOMP

Связь распределенных компонентов ИК DISCOMP между собой реализована на основе специально разработанного протокола сетевого взаимодействия, поддерживающего обмен сообщениями, удаленный вызов процедур и передачу больших объемов бинарных данных. Протокол сетевого взаимодействия обеспечивает высокопроизводительный обмен данными между компонентами ИК DISCOMP за счет установки между ними непрерывного соединения по TCP-каналу, использования многопоточного режима работы серверной части ИК DISCOMP и минимизации объемов управляющих данных в теле передаваемого сообщения.

Эффективность решения задач в РППП обеспечивается следующими особенностями работы ИК DISCOMP: возможностью максимально эффективного использования разнородных ресурсов РВС; поддержкой высокопроизводительного взаимодействия между распределенными компонентами ИК DISCOMP; гибкой диспетчеризацией очередей задач; наличием средств оптимизации объемов данных, передаваемых между модулями в процессе решения задач в РВС; возможностью динамического управления процессами решения задач. Более подробно механизмы построения эффективных вычислительных процессов для ИК DISCOMP рассмотрены в [7, с. 175 – 180].

Вычислительный эксперимент

Представленные в данной работе инструментальные средства получили широкое применение в Суперкомпьютерном центре коллективного пользования ИДСТУ СО РАН при решении прикладных задач из различных предметных областей: исследование биоресурсов озера Байкал; моделирование логистических складских систем; решение задач оптимального управления, решение систем булевых уравнений и других.

С помощью ИК ORLANDO был разработан пакет ГРАДИЕНТ, предназначенный для поиска глобального минимума многоэкстремальной функции высокой размерности с помощью метода мультистарта. Пакет позволяет варьировать управляющие параметры, влияющие на точность нахождения глобального минимума и время решения задачи. Возможности пакета испытывались на ряде много-экстремальных функций (Катковника, Растригина, Griewank), относящихся к классу сложных задач оптимизации. Результаты вычислительного эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Время решения задачи поиска глобального минимума

Функция	Время решения задачи на 2-х ядрах	Время решения задачи на 8-ми ядрах	Время решения задачи на 32-х ядрах
Катковника	8 ч	115 – 125 мин	30 – 35 мин
Растригина	7 ч	100 – 115 мин	30 – 35 мин
Griewank	10 ч	150 – 170 мин	40 – 45 мин

Одним из показательных примеров применения ИК DISCOMP являются задачи обращения дискретных функций. Разработанный средствами ИК DISCOMP пакет D-SAT [8, с. 43 – 50] реализует технологию крупноблочного распараллеливания SAT-задач. С применением этого пакета был успешно проведен распределенный криптоанализ генераторов двоичных шифров: Гиффорда, суммирующего и порогового. Вычислительные эксперименты проводились в РВС, включающей 20 двухпроцессорных узлов (всего 160 процессорных ядер). В таблице 2 приведены сравнительные результаты криптоанализа, выполненного на одном ядре и в РВС как с применением механизмов устранения вычислительной избыточности, так и без них.

Таблица 2

Время решения SAT-задач

SAT-задача криптоанализа	Время решения SAT-задачи на одном вычислительном ядре	Время решения SAT-задачи в РВС из 160 ядер	Время решения SAT-задачи в РВС из 160 ядер с устранением вычислительной избыточности
Генератор Гиффорда	14 – 30 ч	1 – 2 ч	30 – 60 мин
Суммирующий генератор	20 мин – 2 ч	10 – 30 мин	2 – 6 мин
Пороговый генератор	≥ 3 суток	30 – 120 мин	6 – 10 мин

Закключение

Представленный в данной работе подход к организации параллельных и распределенных пакетов прикладных программ допускает естественное развитие и обобщение для базовых технологий параллельных и распределенных вычислений и новых классов фундаментальных и прикладных исследовательских задач. Архитектура и принципы работы рассмотренных инструментальных средств обеспечивают широкий спектр функциональных возможностей по разработке и применению таких пакетов для вычислительных систем различного типа.

Литература

1. Тыугу, Э. Х. Алгоритмы структурного синтеза программ / Э. Х. Тыугу, М. Я. Харф // Программирование. – 1980. – № 4.
2. СПОРА – система программирования с автоматическим синтезом программ / И. О. Бабаев, С. С. Лавров, Г. А. Нецветаева [и др.] // Применение методов математической логики. – Таллин: ИК АН ЭССР, 1983.
3. Опарин, Г. А. САТУРН – метасистема для построения пакетов прикладных программ / Г. А. Опарин // Разработка пакетов прикладных программ. – Новосибирск: Наука, 1982.
4. Высокопроизводительные вычислительные ресурсы ИДСТУ СО РАН: текущее состояние, возможности и перспективы развития / И. В. Бычков, Г. А. Опарин, А. П. Новопапин [и др.] // Вычислительные технологии. – 2010. – Т. 15. – № 3.
5. Опарин, Г. А. Булевы модели синтеза параллельных планов решения вычислительных задач / Г. А. Опарин, А. П. Новопапин // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2008. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 53 – 59.
6. Опарин, Г. А. Язык описания модели предметной области в пакетах прикладных программ / Г. А. Опарин, А. Г. Феоктистов, С. А. Горский // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1.
7. Опарин, Г. А. Технология организации распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP / Г. А. Опарин, А. Г. Феоктистов, И. А. Сидоров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 28.
8. Заикин, О. С. Технология крупноблочного параллелизма в SAT-задачах / О. С. Заикин, А. А. Семенов // Проблемы управления. – 2008. – № 1.

Информация об авторах:

Бычков Игорь Вячеславович – доктор технических наук, академик РАН, профессор, директор ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 42-71-00, buchkov@icc.ru

Buchkov Igor Vyacheslavovich – Doctor of Technical Sciences, Academician of the RAS, Professor, Director of Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Опарин Геннадий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, зам. директора по НР ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-30-61, oparin@icc.ru

Oparin Gennadiy Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Science at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Новопашин Алексей Петрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией параллельных и распределенных вычислительных систем ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-30-62, apn@icc.ru

Novopashin Alexey Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Parallel and Distributed Computing of the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Сидоров Иван Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-30-62, ivan.sidorov@icc.ru

Sidorov Ivan Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, researcher at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Горский Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-30-17, gorsky@icc.ru

Gorskiy Sergey Alexeevich – Candidate of Technical Sciences, researcher at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 004.75

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМ РАЗВИТИЕМ

**И. В. Бычков, Г. М. Ружников, А. Е. Хмельнов, Р. К. Фёдоров,
А. С. Гаченко, А. О. Шигаров, В. В. Парамонов**

DEVELOPING COMPONENTS OF SPATIAL DATA INFRASTRUCTURE FOR THE REGIONAL DEVELOPMENT

**I. V. Buchkov, G. M. Ruzhnikov, A. E. Hmelnov, R. K. Fedorov,
A. S. Gachenko, A. O. Shigarov, V. V. Paramonov**

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-07-00426-а, 11-07-92204-Монг а, проекта ОНИТ СО РАН № 3 2009-2011 и интеграционных проектов СО РАН 2012-2014 № 17, 73, 131.

В статье рассматривается реализация основных компонентов инфраструктуры пространственных данных для управления территориальным развитием. Основной целью создания компонентов является обеспечение общей платформы для совместной работы с распределенными сервисами геообработки и пространственными данными. Данная платформа реализует общие для сервисов геообработки функции, например, вызов распределенных сервисов геообработки, систему управления доступом, визуализацию данных и т. д., упрощая публикацию новых сервисов для открытого доступа.

The paper considers implementation of the basic components of spatial data infrastructure for managing regional development. The main purpose of the components is to provide a common platform to work together with the methods of processing and data of different users. The platform implements capabilities being common for geoprocessing services, for example, calling distributed services, access control, data visualization, etc., simplifying publication of new services.

Ключевые слова: инфраструктура пространственных данных, геопортал, распределенные методы вычислений, сервисы геообработки

Keywords: spatial data infrastructure, geoportal, distributed computing methods, geoprocessing services

Введение

В институтах Иркутского и Бурятского научных центров (ИНЦ и БНЦ) СО РАН постоянно проводятся научные исследования Байкальской природной территории. К настоящему времени в результате таких исследований накоплено большое количество уникальных проблемно и предметно-ориентированных пространственных данных [7, с. 14 – 18; 8, с. 20 – 28; 9, с. 85 – 87; 10; 11, с. 1331 – 1334], а также созданы новые методы анализа и обработки пространственной информации. Однако, в большинстве случаев такие данные и методы их обработки не доступны для совместного использования. Для междисциплинарных научных исследований Байкальской природной территории актуальным является создание соответствующей локальной инфраструктуры пространственных данных институтов ИНЦ и БНЦ СО РАН. Это позволит представить созданные в этих институтах уникальные пространственные данные и методы пространственной обработки в виде пространственных сервисов для обеспечения будущих научных исследований Байкальской природной территории современными возможностями работы с пространственными данными.

Обработка геоданных изначально считалась прерогативой настольных программных систем. Это происходило из-за большого объема обрабатываемых данных, низкой скорости передачи данных через Интернет, недостаточным развитием средств пользовательского интерфейса Интернет приложений. На сегодняшний день сети передачи данных и интернет технологии активно развиваются. В частности, активно развиваются технологии обработки данных, в которых компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как Интернет-сервис. Перенос обработки и хранения данных на удаленные серверы имеет ряд преимуществ: для работы пользователю часто достаточно иметь только браузер, пользователь не привязан к рабочему месту, значительно проще обновление и обслуживание систем. Примером таких сервисов является система хранения и редактирования документов Google (<http://docs.google.com>).

В этом направлении развиваются географические информационные системы (ГИС), например FreeGIS Database (<http://freegis.org>), Quantum GIS Project (<http://www.qgis.org/>), Advanced Geographical Information System for the Web (<http://www.cartoweb.org/>), а также геопорталы, являющиеся важным элементом инфраструктуры пространственных данных (ИПД) [4, 6]. Необходимо заметить, что в ИПД геопорталы реализуют в основном функции, связанные с публикацией данных в Интернете, т. е. загрузку и визуализацию данных, формирование метаданных и т. д. Применение алгоритмов геообработки (для выполнения задач анализа) в геопорталах развито достаточно слабо. Хотя существуют программы, реализующие функции геообработки, в открытом доступе.

Создание инфраструктуры пространственных данных для проведения научных исследований является перспективным направлением развития геоинформационных технологий и обладает рядом преимуществ:

- обеспечение надежного хранения данных;
- открытый доступ к алгоритмам, моделям и методам геообработки данных, возможность постоянного расширения банка алгоритмов;
- отсутствие необходимости установки у пользователя программного обеспечения и его обслуживания;
- использование вычислений в распределенной среде (многопроцессорные системы) для ресурсоемких приложений геообработки.

Общие принципы построения геопортала

Рассмотрим основные принципы (требования) построения геопортала:

– Удобство работы. Геопортал должен обеспечивать: использование набора сервисов геообработки и пространственных данных, распределенных на различных серверах (рис. 1); для пользователя использование сервисов, расположенных на удаленных серверах, не должно отличаться от работы с локальными сервисами; поддержку большинства распространенных форматов пространственных данных и проекции; предоставление удобного, интуитивно понятного пользовательского интерфейса; возможность быстрой публикации в Интернете как данных, так и метаданных.

– Надежность. Обеспечение надежного хранения данных на сервере и предоставление функций работы с файловой системой сервера. Обеспечение регламентированного доступа к пользовательским сервисам геообработки и пространственным данным. Самостоятельное определение поставщиком регламента доступа к его сервисам и данным.

– Расширяемость. Использование открытой архитектуры, которая позволяет расширять функциональность геопортала путем добавления новых сервисов, находящихся локально на сервере геопортала, так и удаленно на других серверах. Поддержка стандартов в области геоинформатики для учёта новых программных систем, реализующих функции анализа и обработки, что увеличивает интероперабельность программных систем.

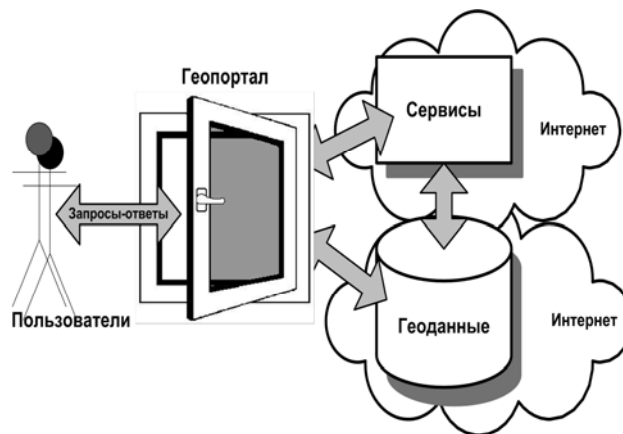


Рис. 1. Геопортал как единая точка доступа к сервисам геообработки и пространственным данным

Архитектура геопортала ИИЦ СО РАН

Основываясь на приведенных принципах построения геопортала и существующих стандартах, разработана следующая архитектура (рис. 2).



Рис. 2. Архитектура геопортала

Архитектура разрабатываемой системы является клиент-серверной. Основным компонентом на стороне пользователя является Web-клиент, работающий на основе браузера. Предполагается, что с помощью его можно выполнить большинство функций геопортала. Кроме Web-клиента, возможно использование различных ГИС и прочих программ, поддерживающих стандарты OGC. На серверной стороне находится расширяемый комплекс различных компонентов. Рассмотрим более подробно основные серверные компоненты системы.

Система управления сервисами и геоданными (СУСГ) осуществляет общее управление над геопорталом. Предоставляет следующие функции: файловый менеджер, управление доступом к данным и сервисам, публикацию и отображение пространственных данных, запуск методов геообработки данных. СУСГ разработан на основе свободно-распространяемой системы управления содержимым Drupal.

Система хранения данных (СХД) – программно-аппаратное обеспечение надежного хранения данных на основе SAN ReadyStorage 3994 с общей стартовой дисковой емкостью 62 Тбайт, которое гарантирует надежное хранение пользовательских данных, бесперебойную работу и достаточно высокую скорость чтения/записи данных. Доступ к СХД производится с помощью файлового менеджера.

Система управления базами данных PostgreSQL (с расширением для обработки пространственных данных PostGIS) предназначена для хранения пользовательских наборов данных и служебной информации геопортала. Расширение PostGIS позволяет хранить пространственные данные и реализует поддержку стандартов OGC. Управление над базами данных (БД) осуществляется с помощью СУСГ: создание пользователей БД на основе регистрации в портале, создание схем данных, предоставление соответствующих прав доступа, конвертацию данных и т. д.

SMDServer – предназначен для визуализации карт в сети Интернет. Обеспечивает высокую скорость отображения графической и атрибутивной информации.

Сервисы предоставляют обработку пространственных данных, т. е. это программные единицы, выполняющие различные функции и предоставляющие некоторый интерфейс. Архитектура разработана таким образом, чтобы обеспечить возможность расширения функциональности путем добавления новых сервисов. Большинство функций геопортала реализовано в виде сервисов, например конвертация данных из одного формата в другой.

Рассмотрим более подробно основные компоненты архитектуры геопортала.

Управление данными

Хранение данных пользователей осуществляется на основе СХД SAN ReadyStorage 3994 в виде файловой системы. Каждому пользователю предоставляется директория в рамках СХД. Создание директории и выделение соответствующих прав выполняет СУСГ. Управление файловой системой в рамках выделенной директории пользователь производит с помощью файлового менеджера (рис. 3).

Файловый менеджер является частью СУСД и позволяет производить все основные операции с файловой системой через Web-клиента, а также загрузку и выгрузку данных с компьютера пользователя. Для удобства данные можно загружать и выгружать в архивированном виде. Имеются специализированные сервисы, позволяющие архивировать/разархивировать данные в СХД.



Рис. 3. Файловый менеджер

Для передачи данных пользователей Геопортала большого объема, либо большого количества целесообразно использовать протокол передачи данных FTP (File Transfer Protocol), который ориентирован как раз на передачу файлов. Однако в данном протоколе существует серьезная проблема, касающаяся безопасности – данные пользователя (логин/пароль) передаются в открытом виде, что является недопустимым в случае работы с информацией, составляющей, например, интеллектуальную собственность. В таких случаях используется защищенный протокол FTPS (File Transfer Protocol + SSL). FTPS является аналогом FTP, однако соединение с сервером защищено при помощи криптографических протоколов SSL (Secure Sockets Layer) или TLS (Transport Layer Security). В результате применения данных протоколов вся передаваемая информация шифруется, что обеспечивает конфиденциальность, как идентификационных данных пользователя, так и передаваемой информации.

Для осуществления доступа к геопорталу по протоколу FTPS установлен и настроен FTP-сервер FileZilla [2]. FileZilla является свободным FTP-сервером с открытым кодом и GNU-лицензией, он поддерживает как FTP, так и FTPS, SFTP (SSH File Transfer Protocol) протоколы передачи данных. Сервер является кроссплатформенным, что позволяет использовать его даже в случае изменения программной платформы, на которой базируется геопортал. Управление сервером FileZilla осуществляется геопорталом.

Публикация и визуализация пространственных данных

Для визуализации пространственных данных разработан оригинальный сервис, называемый SMDServer, который, в том числе, реализует WMS стандарт. Поэтому для работы с SMDServer может использоваться любой клиент визуализации пространственных данных с поддержкой WMS, например, широко распространенный web-клиент OpenLayers или настольная ГИС MapInfo.

SMDServer базируется на следующих принципах:

- данные не требуется редактировать, поэтому они рассматриваются как неизменяемые;
- программа просмотра должна отображать весь объем данных, как единое целое;
- время отображения любого фрагмента карты должно быть максимально сокращено;

- основная задача – поиск информации на карте;
- при необходимости более сложной обработки выбранный фрагмент может быть экспортирован.

В SMDServer используется оригинальный формат представления векторных данных, названный SMD (Static Map Data). Это формат позволяет эффективно (по времени отображения на экран) визуализировать пространственные данные, включая сверхбольшие массивы таких данных. Также SMD позволяет хранить и обрабатывать семантическую информацию, как для реляционного, так и для тегового представления. Основными операциями, производимыми над данными в формате SMD, являются просмотр и выборка карт. При этом предполагается, что пространственные данные подготавливается в других ГИС с использованием их аналитических возможностей. Для преобразования таких данных в формат SMD разработан ряд конверторов из следующих форматов: SXF/RSC (ГИС Панорама), APR/Shape (ГИС ArcView), WOR/TAB (ГИС MapInfo), ГИС КАМАТ. При этом SMD поддерживает импорт не только метрической и семантической информации, но и способа визуализации. Скорость работы SMDServer на Pentium IV 3GHz при работе с картой Иркутска, которая содержит 820 тыс. объектов (данные занимают 125 Mb) составляет: вся карта отображается за 3 с., загрузка этой карты в память выполняется за 10 с.

При загрузке популярных форматов карт в СХД производится автоматическая конвертация в формат SMD и регистрация в SMDServer. Файловый менеджер при изменении содержимого той или иной директории отправляет сообщение модулю публикации, который при изменении содержащихся картографических файлов в директории производит их конвертацию или удаление соответствующих SMD файлов. Затем производится их регистрация в инициализационном файле SMDServer. Просмотр данных в этом случае доступен только владельцу данных. Для просмотра данных другими пользователями необходима их публикация, т. е. пользователь должен подтвердить на специальной форме, что он данные желает опубликовать. Публикация производится наборами данных. Набор данных это директория с семантически связанными картографическими слоями, находящимися в одной проекции на одну территорию. Во время публикации пользователь должен указать, в какой директории находятся данные, и ввести метаданные, описывающие создаваемый ресурс.

Управление метаданными

Стандарты метаданных устанавливают регламент взаимодействия участников информационного обмена и разработчиков в сфере создания геопорталов. С их помощью можно создавать словари и классификаторы, специфичные для междисциплинарных научных исследований. За основу представления и хранения метаданных в рамках геопортала выбран известный стандарт FGDC-STD-001-1998 (Content Standards for Digital Geospatial Metadata) – американский прототип ISO 19115, стандарт содержания на цифровые пространственные метаданные. Механизмы хранения и обработки метаданных реализованы на основе GeoNetwork [3] стандартизированной и децентрализованной среды управления пространственной информацией, разработанной для доступа к базам геоданных, картографическим продуктам и связанным с ними метаданным из различных источников, повышающей эффективность обмена пространственной информацией между институтами и ее совместное использование посредством Интернета. Такой подход обеспечивает увеличение доступности пространственных данных различного масштаба при проведении междисциплинарных исследований.

Сервисы геообработки

Развитие стандартов, унифицирующих использование различных сервисов геообработки данных через Интернет, позволяет упростить их использование. В рамках геопортала стандарты используются следующим образом. Методы обработки пространственных данных реализуются в виде сервисов, поддерживающих стандарт Web Processing Service (WPS) [5]. Затем эти сервисы регистрируются в каталоге сервисов, предназначенном для систематизации информации о существующих методах обработки пространственных данных и обеспечения возможности использования сервисов геообработки на программном уровне. Предлагаемый каталог разработан на основе модуля node системы управления контентом Drupal. Это позволяет использовать существующую настраиваемую систему классификации в Drupal. После регистрации с помощью Web-клиента пользователь геопортала может воспользоваться сервисами, используя свои данные, и получить результаты обработки. Входные данные могут быть представлены в виде файлов, строковых и числовых параметров. Результаты обработки сохраняются в СХД.

Сервисы могут быть встроенными (т. е. программными модулями, выполняющими обработку данных на локальном сервере геопортала) и внешними (выполняются на удаленных серверах и должны поддерживать стандарт WPS). С точки зрения пользователя работа с встроенными и внешними сервисами не отличается. При обращении к определенному сервису модуль управления сервисами генерирует форму для ввода пользователем параметров (рис. 4). Затем формируется запрос и запускается обработка. В качестве встроенных сервисов предполагается использовать существующее программное обеспечение, которое обычно не поддерживает стандарт WPS. Поэтому для организации взаимодействия геопортала с существ-

вующим программным обеспечением требуется создание специальных компонентов-посредников (PHP Proxy), необходимых для запуска, сбора и передачи данных (рис. 5).

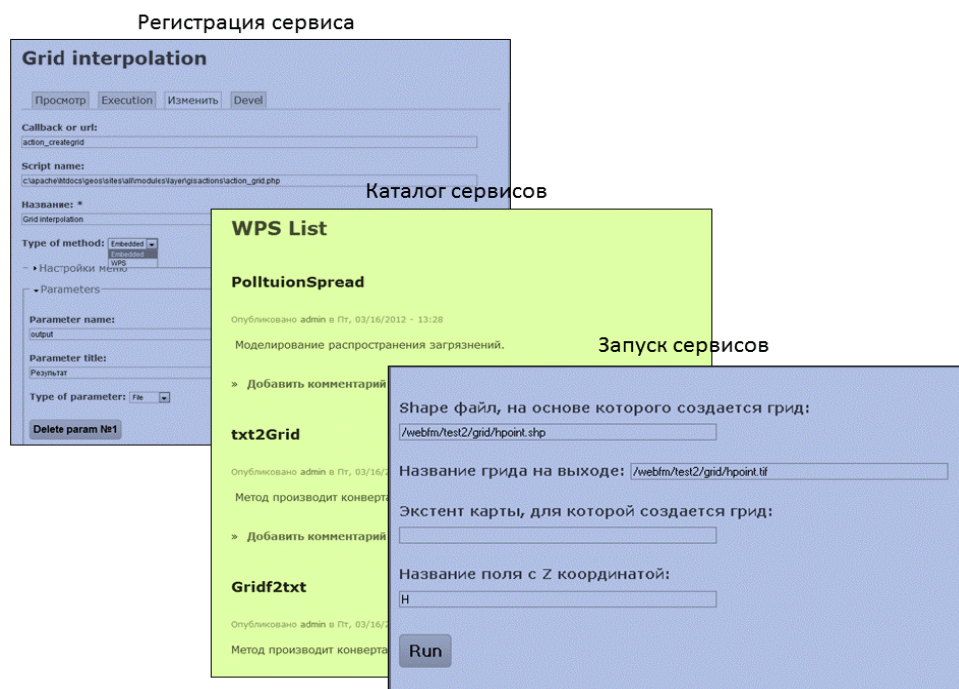


Рис. 4. Каталог сервисов



Рис. 5. Взаимодействие сервисов с геопорталом

Заключение

Перечисленные компоненты успешно апробированы и используются в процесс проведения междисциплинарных научных исследований геосистем и биоразнообразия Прибайкалья и Забайкалья. В данный момент процесс разработки и модернизации продолжается. Так в частности планируется развитие компонента управления вычислительным процессом, проводится разработка новых сервисов.

Литература

1. Armburst, M. et al. Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing. Tech. report UCB/EECS-2009-28, Electrical Eng. and Computer Science Dept., Univ. of California, Berkeley, 2009.
2. FileZilla The free FTP solution [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://filezillaproject.org/index.php>

3. GeoNetwork [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geonetwork-opensource.org>.
4. Geospatial Portal Reference Architecture. A Community Guide to Implementing Standards-Based Geospatial Portals // Ed. Louis C. Rose. Open Geospatial Consortium Inc. OGC 04-039 Ver. 0.2. 2004.
5. OGC Web Processing Service (WPS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.open-geospatial.org/standards/wps>.
6. The SDI Cookbook. Eds: D.D. Nebert. Global Spatial Data Infrastructure (GSDI) Association. 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gsdi.org/gsdicookbookindex>
7. Бешенцев, А. Н. Картографический мониторинг природопользования / А. Н. Бешенцев // Геодезия и картография. – 2011. – № 3.
8. Структурно-типологические характеристики и экологический потенциал геосистем Байкальского региона / И. В. Бычков, Т. И. Кузнецова, А. Р. Батуев [и др.] // География и природные ресурсы. – 2011. – № 4.
9. Междисциплинарные научные исследования геосистем и биоразнообразия Байкальского региона: инфраструктура и сервисы пространственных данных / И. В. Бычков, Г. М. Ружников, А. Е. Хмельнов [и др.] // Тематическое картографирование для создания инфраструктур пространственных данных: IX Научная конференция по тематической картографии. – Иркутск: Издательство Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2010. – Т. I.
10. Интеграция информационно-аналитических ресурсов и обработка пространственных данных в задачах управления территориальным развитием / И. В. Бычков, Г. М. Ружников, А. Е. Хмельнов [и др.] – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 369 с.
11. Опыт применения геоинформационных баз данных для анализа энтомофауны Байкальской Сибири / А. С. Плешанов, И. В. Бычков, И. А. Антонов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. – № 15.

Информация об авторах:

Бычков Игорь Вячеславович – доктор технических наук, академик РАН, профессор, директор ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 42-71-00, bychkov@icc.ru.

Bychkov Igor Vyacheslavovich – Doctor of Technical Sciences, Academician of the RAS, Professor, Director of Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Ружников Геннадий Михайлович – кандидат технических наук, заместитель директора ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-30-06, ruginov@icc.ru.

Ruzhnikov Gennadiy Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Хмельнов Алексей Евгеньевич – кандидат технических наук, зав. лабораторией 4.1 ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-30-71, hmelnov@icc.ru.

Khmelnov Alexey Evgenievich – Candidate of Technical Sciences, Head of 4.1 Laboratory at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Фёдоров Роман Константинович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-31-08, fedorov@icc.ru.

Fedorov Roman Konstantinovich – Candidate of Technical Sciences, leading researcher at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Гаченко Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-31-03, gachenko@icc.ru.

Gachenko Andrey Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, researcher at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Шигаров Алексей Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-31-02, shigarov@icc.ru.

Shigarov Alexey Olegovich – Candidate of Technical Sciences, senior researcher at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

Парамонов Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник ИДСТУ СО РАН, т. 8(3952) 45-30-73, slv@icc.ru.

Paramonov Vyacheslav Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, researcher at the Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 519.21:502.3

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ КОЛМОГОРОВА

Т. В. Гавриленко, О. В. Адмаев

ESTIMATION OF ATMOSPHERIC AIR ECOLOGICAL SAFETY ON THE BASIS OF KOLMOGOROV EQUATIONS SOLUTION

T. V. Gavrilenko, O. V. Admaev

Рассматривается математическая модель прогноза состояний атмосферного воздуха. Система разбивается на пять дискретных состояний, характеризующихся интегральным показателем загрязнения. Система моделируется ориентированным графом, вершины которого соответствуют состояниям воздушной среды, а стрелки – возможностям перехода из одного состояния в другое. Граф описывается системой из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова, решение которой находится численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка при заданных начальных условиях. Расчеты показали, что система достаточно быстро выходит на стационарный режим независимо от вида начальных условий для вероятностей состояний воздушной среды.

The mathematical model of atmospheric air states prognosis is examined. The system is broken up into five discrete states, characterized by the integral index of contamination. The system is designed by the oriented graph, whose tops correspond to the states of air environment, and the pointers – to the possibilities of transition from one state into other. A count is described by the system of five common Kolmogorov differential equations that can be solved numerally with Runge-Kutt method of fourth order at the set initial conditions. Calculations showed that the system passed to the stationary mode rather quickly, regardless of the type of initial conditions for the air environment states probabilities.

Ключевые слова: Марковский процесс, уравнения Колмогорова, состояние атмосферного воздуха.

Keywords: Markov process, Kolmogorov equations, state of atmospheric air.

Оценка состояния воздушной среды больших городов представляет собой актуальную задачу. Методики прогноза базируются на различных математических моделях, использующих как аппарат дифференциальных уравнений, так и вероятностно-статистические методы. В данной работе для прогноза состояний воздушной среды города рассматривается математическая модель, основанная на однородных марковских случайных процессах.

Пусть атмосферный воздух в исследуемом районе города представляет собой систему $S(t)$, принимающую в момент времени t какое-либо из n возможных состояний $s_1, s_2, \dots, s_n$. Случайный процесс, протекающий в системе $S(t)$ с дискретными состояниями $s_1, s_2, \dots, s_n$, будем считать Марковским. Это означает, что для любого момента времени t_0 вероятность каждого из состояний системы в будущем (при $t > t_0$) зависит только от её состояния в настоящем ($t=t_0$) и не зависит от её поведения в прошлом ($t < t_0$) [1].

В настоящее время для оценки загрязнения атмосферного воздуха используется интегральный показатель – индекс загрязнения атмосферы, рассчитываемый по пяти наиболее значимым ингредиентам:

$$ИЗА_5 = \sum_{i=1}^5 q_i,$$

где

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{ПДК,i}},$$

Q_i – концентрация i -го вещества в конкретный срок наблюдений, $Q_{ПДК,i}$ – его предельно допустимая концентрация. Например, для г. Красноярска наиболее значимыми ингредиентами считаются: бенз/а/пирен, взвешенные вещества, формальдегид, диоксид азота и оксид азота. Их предельно допустимые концентрации и класс опасности приведены в табл. 1 [2, 3].

Характеристики веществ, учитываемых в индексе загрязнения атмосферы

Вещество	ПДК максимально разовая, мг/м ³	ПДК среднесуточная, мг/м ³	Класс опасности
Бенз/а/пирен	-	0,1·10 ⁻⁵	1
Формальдегид	0,035	0,003	2
Взвешенные вещества	0,5	0,15	3
Диоксид азота	0,2	0,04	2
Оксид азота	0,4	0,06	3

Кроме показателя ИЗА5 загрязнение атмосферного воздуха можно оценивать по зависимости

$$C = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 q_i. \quad (1)$$

Показатель (1) является более удобным, т. к. он представляет не сумму средних значений концентраций веществ, как ИЗА₅, а среднюю концентрацию всех наиболее значимых веществ. Это позволяет оценить во сколько раз среднее значение этих веществ превышает их ПДК [4].

В зависимости от значения показателя ИЗА₅ (или C) выделяют пять состояний атмосферного воздуха, соответствующих различным степеням его загрязнения [4]. Характеристики состояний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Классификация состояний воздушной среды

Состояние	Обозначение	Загрязнение воздушной среды	Показатель ИЗА5	Показатель C
1	s_1	Малое	Менее 5,0	Менее 1,0
2	s_2	Умеренное	От 5,0 до 7,0	От 1,0 до 1,4
3	s_3	Высокое	От 7,0 до 14,0	От 1,4 до 2,8
4	s_4	Очень высокое	От 14,0 до 21,0	От 2,8 до 4,2
5	s_5	Экстремально высокое	Более 21,0	Более 4,2

Таким образом, систему $S(t)$ можно представить в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют состояниям воздушной среды ($n = 5$), а стрелки – возможностям перехода из одного состояния в другое (рис. 1).

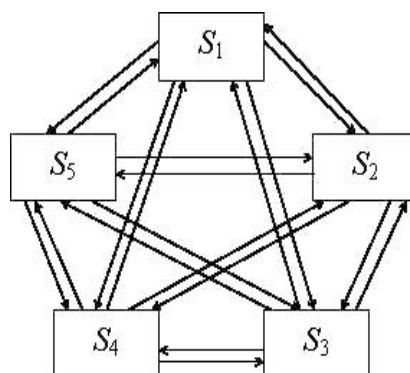


Рис. 1. Граф, описывающий состояние атмосферного воздуха

Обозначим вероятность i -го состояния в момент t (вероятность события, состоящего в том, что в момент t система $S(t)$ будет находиться в состоянии s_i) как $p_i(t) = P\{S(t) = s_i\}$. Очевидно, что для системы с дискретными состояниями в любой момент времени t сумма вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^5 p_i(t) = 1,$$

так как в любой момент времени t события $\{S(t) = s_1\}, \{S(t) = s_2\}, \dots, \{S(t) = s_5\}$ образуют полную группу несовместных событий.

Предполагаем, что переходы из состояния в состояние происходят под воздействием стационарных пуассоновских потоков событий. Вероятность перехода системы $S(t)$ из состояния $s_i = S(t)$, в состояние $s_j = S(t + \Delta t)$ за элементарный промежуток времени Δt ,

$$p_{ij}(t) \approx \lambda_{ij} \Delta t,$$

где λ_{ij} – интенсивность пуассоновского потока событий, переводящего систему из s_i в s_j . Тогда граф описывается системой из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова [1]:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^5 p_j(t) \lambda_{ji} - p_i(t) \sum_{j=1}^5 \lambda_{ij}, \quad i=1, \dots, 5. \quad (2)$$

Первая сумма в правой части уравнений системы (2) распространяется на значения j , для которых возможен непосредственный переход из состояния s_j в s_i (т. е. $\lambda_{ji} \neq 0$), а вторая – на значения j , для которых возможен непосредственный переход из s_i в s_j (т. е. $\lambda_{ij} \neq 0$).

Система (2) решается при начальных условиях:

$$\begin{aligned} p_1(0) &= p_1^0; p_2(0) = p_2^0; p_3(0) = \\ &= p_3^0; p_4(0) = p_4^0; p_5(0) = p_5^0. \end{aligned} \quad (3)$$

Оценка интенсивностей λ_{ij} производится по агрегированной информации в виде относительных частот состояний системы $S(t)$ в каждый из моментов времени t . В этом случае выборочные наблюдения за состоянием атмосферы удовлетворяют стохастическому уравнению

$$\mathbf{y}_i(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^5 \mathbf{y}_i(t) \lambda_{ij} + \mathbf{u}_j(t + \Delta t), \quad (4)$$

где $y_i(t)$ – вектор наблюдавшихся частот появления состояния s_i (в момент времени t); $y_j(t + \Delta t)$ – вектор наблюдавшихся частот появления состояния s_j (в момент времени $t + \Delta t$); $u_j(t + \Delta t)$ – вектор случайных ошибок [5].

При $\Delta t = 1$ уравнение (4) перепишется в виде:

$$\mathbf{y}_j(t + 1) = \sum_{i=1}^5 \mathbf{y}_i(t) \lambda_{ij} + \mathbf{u}_j(t + 1). \quad (5)$$

Интенсивности λ_{ij} определяются методом наименьших квадратов с ограничениями, так как обычные оценки по методу наименьших квадратов могут не удовлетворять условиям $0 \leq \lambda_{ij} \leq 1, \quad i, j = 1, \dots, 5$.

В данном методе требуется найти минимум квадратичной формы:

$$\begin{aligned} F &= \sum_{j=1}^5 \mathbf{u}_j' \mathbf{u}_j = \\ &= \sum_{j=1}^5 (\mathbf{y}_j - X_j \lambda_j)' \cdot (\mathbf{y}_j - X_j \lambda_j), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_j &= \{y_j(1), y_j(2), \dots, y_j(T)\}, \\ \mathbf{u}_j &= \{u_j(1), u_j(2), \dots, u_j(T)\}, \\ \lambda_j &= \{\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{5j}\}, \end{aligned}$$

$$X_j = \begin{bmatrix} y_1(0) & y_2(0) & \dots & y_5(0) \\ y_1(1) & y_2(1) & \dots & y_5(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_1(T-1) & y_2(T-1) & \dots & y_5(T-1) \end{bmatrix},$$

T – длина выборки.

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации интенсивностей λ_{ij} определяется по формуле:

$$\varepsilon_j = \sqrt{\sum_{t=1}^T u_j^2(t) / T},$$

где $u_j(t)$ – компоненты вектора случайных ошибок, определяемые из уравнения (5), $j=1, \dots, 5$. В более подробном виде алгоритм нахождения минимума формы (6) изложен в [6, с. 1087 – 1090].

Применение изложенной методики проиллюстрируем на примере, в котором моделирование случайного процесса проводится с помощью пары независимых стандартных нормальных (т. е. гауссовских с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин x_1 и x_2 , определяемых по формулам:

$$x_1 = (-\ln \alpha_1)^{-1/2} \cos(2\pi\alpha_2),$$

$$x_2 = (-\ln \alpha_1)^{-1/2} \sin(2\pi\alpha_2),$$

где α_1 и α_2 – случайные равномерно распределенные величины из интервала от 0 до 1, генерируемые датчиком псевдослучайных чисел [7].

Каждая выборка представляет собой модель изменения средненедельного показателя C , в течение календарного года. Средние значения примем по среднегодовым показателям ИЗА₅, пересчитанным по формуле (1). Среднегодовые значения ИЗА₅, в г. Красноярске, наблюдавшиеся в период с 1997 г. по 2010 г., приведены на рис. 2 [2]. Коэффициент вариации принимается равным 0,32.

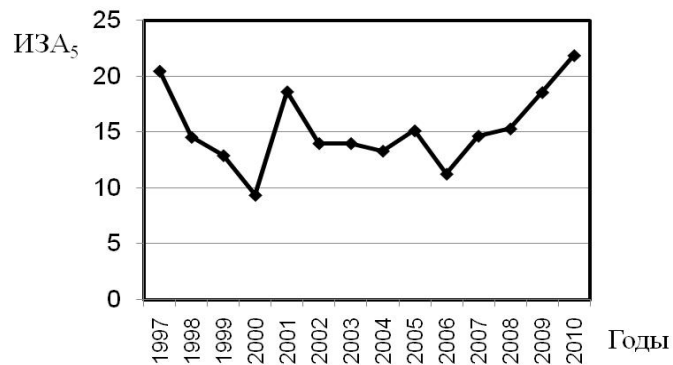


Рис. 2. Изменение индекса загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА₅) в г. Красноярске

В итоге было построено 14 реализаций случайного процесса изменений показателя C , один из которых (для данных 2010 года) приведен на рис. 3.

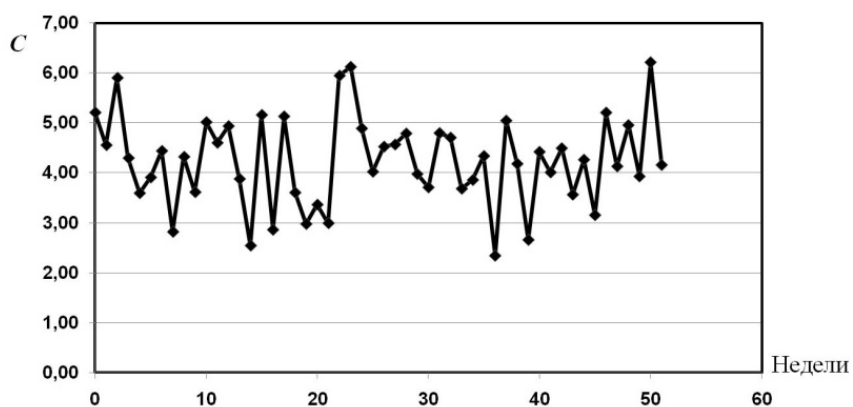


Рис. 3. Модель реализации случайного процесса изменения показателя C

В результате расчетов была получена матрица интенсивностей вероятностей перехода

$$\|\lambda_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0,487 & 0,169 & 0,344 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 1,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,394 & 0,425 & 0,181 \\ 0,023 & 0,043 & 0,361 & 0,429 & 0,144 \\ 0,0 & 0,0 & 0,723 & 0,277 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Подставляя значения элементов матрицы (7) в уравнение (2), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = 0,023p_4 - p_1(0,169 + 0,344), \\ \frac{dp_2}{dt} = 0,169p_1 + 0,043p_4 - p_2, \\ \frac{dp_3}{dt} = 0,344p_1 + 0,361p_4 + 0,723p_5 - p_3(0,425 + 0,181), \\ \frac{dp_4}{dt} = p_2 + 0,425p_3 + 0,277p_5 - p_4(0,023 + 0,043 + 0,361 + 0,144), \\ \frac{dp_5}{dt} = 0,181p_3 + 0,144p_4 - p_5(0,723 + 0,277). \end{cases}$$

После преобразований данная система примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = -0,513p_1 + 0,023p_4, \\ \frac{dp_2}{dt} = 0,169p_1 - p_2 + 0,043p_4, \\ \frac{dp_3}{dt} = 0,344p_1 - 0,606p_3 + 0,361p_4 + 0,723p_5, \\ \frac{dp_4}{dt} = p_2 + 0,425p_3 - 0,571p_4 + 0,277p_5, \\ \frac{dp_5}{dt} = 0,181p_3 + 0,144p_4 - p_5. \end{cases}$$

Её решение находится численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка при начальных условиях (3). Расчеты показали, что система выходит на стационарный режим. При этом время его достижения сильно зависит от выбора начальных условий. На рис. 4 приведены решения при различных начальных условиях: слева – при $p_i(0)=0,2$; $i=1, \dots, 5$; справа – при $p_1(0)=1$; $p_i(0)=0$; $i=2, \dots, 5$. Вероятности наступления состояний загрязнения воздушной среды достигают значений $p_1=0,027$; $p_2=0,031$; $p_3=0,202$; $p_4=0,615$; $p_5=0,125$ соответственно для малого, умеренного, высокого, очень высокого и экстремально высокого уровней загрязнения.

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации интенсивностей λ_{ij} составила $\varepsilon_1=0,01$; $\varepsilon_2=0,03$; $\varepsilon_3=0,1$; $\varepsilon_4=0,24$; $\varepsilon_5=0,12$.

Выводы

1. Наиболее вероятным состоянием системы является уровень очень высокого загрязнения атмосферного воздуха. Его вероятность составляет 0,615.
2. Вероятность состояний, характеризующихся малым и умеренным уровнем загрязнения, в рассмотренном примере пренебрежимо малы: $p_1=0,027$ и $p_2=0,031$.
3. Время выхода системы на стационарный режим существенно зависит от вида начальных условий.
4. Среднеквадратическая ошибка характеризуется большим разбросом значений от 0,1 до 0,25 и является максимальной для наиболее вероятного состояния.

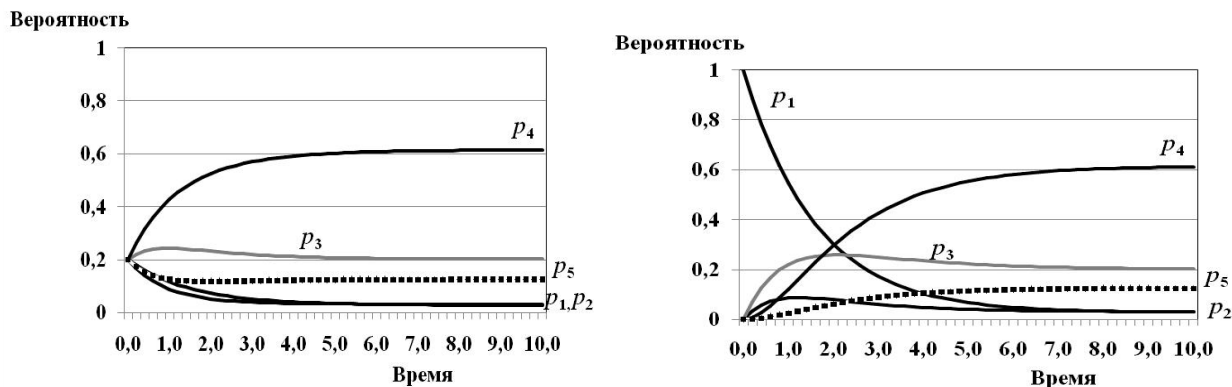


Рис. 4. Вероятности наступления состояний воздушной среды при различных начальных условиях

Литература

1. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2009 год»: ежегодный отчет / М-во природ. ресурсов и лесн. комплекса адм. Красноярского края, Енисейск. упр. Федерал. службы по экол., технол. и атом. надзору, Упр. Федерал. службы по надзору в сфере природопользования по Красноярскому краю. – Красноярск, 2010. – 237 с.
3. Состояние загрязнения атмосферного воздуха города Красноярска [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteo.krasnoyarsk.ru/МониторингОС/tabid/227/Default.aspx>
4. Сверлова, Л. И. Научные основы современного подхода к оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха городов [Текст] / Л. И. Сверлова // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 7.
5. Ли, Ц. Оценивание параметров марковских моделей по агрегированным временным рядам [Текст] / Цунг-Чо Ли, Джордж Г. Джардж, Арнольд Зельнер; пер. с англ. под ред. Н. С. Райбмана. – М.: Статистика, 1977. – 221 с.
6. Адмаев, О. В. Использование марковских процессов для оценки экологической безопасности воздушного пространства города [Текст] / О. В. Адмаев, Т. В. Гавриленко // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 12.
7. Пригарин, С. М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей [Текст] / С. М. Пригарин. – Новосибирск: ИВМ и МГ СО РАН, 2005. – 259 с.

Информация об авторах:

Гавриленко Татьяна Валентиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и городские сооружения» Сибирского федерального университета, т. 8(391)247-72-52.

Gavrilenko Tatiana Valentinovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automobile Roads and City Constructions of Siberian Federal University.

Адмаев Олег Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры эксплуатации железных дорог Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения, т. 8(391)247-72-52, oadmaev@mail.ru.

Admaev Oleg Vasiljevich – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the department of Exploitation of Railways of Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - Branch of Irkutsk State Transport University.

УДК 622.277.3; 622.278

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПОДДЕРЖКИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АКТИВНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ

А. П. Григорюк, Л. П. Брагинская

THE INFORMATIONAL SYSTEM FOR COMPLEX SUPPORT OF SCIENTIFIC INVESTIGATIONS IN ACTIVE SEISMOLOGY

A. P. Grigoriuk, L. P. Braginskaya

В работе представлены архитектура, интерфейс и основные пользовательские сервисы Интернет-ориентированной научной информационной системы для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в области активной сейсмологии с функциями социальной сети.

Основными компонентами НИС являются: информационно-вычислительная система (ИВС), обеспечивающая пользователей многопараметрическим поисковым, вычислительно-аналитическим и ГИС сервисами для работы с данными сейсмического мониторинга в режиме on-line; пополняемая пользователями база данных научных работ – электронная библиотека; пополняемый пользователями библиографический каталог. В настоящее время ресурс доступен по адресу: <http://opg.sssc.ru>.

Architecture, interface and the basic user services of the Internet oriented scientific informational system (SIS) with social network functions for the theoretical and experimental research in active seismology are reported. The main components of SIS comprise the informational and computing system, which supplies the users with multi-parametrical search, digital analytic and GIS services for on-line seismic data monitoring; the e-library and bibliography replenished by users. At present the informational system can be found at <http://opg.sssc.ru>.

Ключевые слова: сейсмология, вычислительные информационные системы, базы данных.

Keywords: seismology, informational computing system, database.

Введение

Современные веб-технологии, известные как технологии веб 2.0, позволяют не просто лучше обслуживать информационные потребности пользователя сети, но и активно вовлекают его во взаимодействие – как с другими пользователями, так и с самими информационными ресурсами. Для научного сообщества социальные технологии веб 2.0 представляют особый интерес. Они позволяют расширить формат профессионального взаимодействия, выводят его на глобальный уровень, стимулируют творческие способности каждого из участников процесса и – что самое существенное – они отвечают традициям научного сообщества, в котором всегда была важна взаимная оценка коллег и признание ими достигнутых результатов.

Инициатива исследовательских организаций по организации открытого доступа к результатам исследований активно поддерживается международным научным сообществом [7].

В настоящее время все большее развитие получают специализированные (для определенной предметной области) информационные системы, обеспечивающие доступ к научным знаниям, включая научные публикации, научные отчеты, базы данных, вычислительные ресурсы, нормативные и другие документы. Эти системы предназначены для таких категорий пользователей, как ученые и эксперты (доступ к научным результатам, научные коммуникации), преподаватели и студенты (образовательный процесс). Как отмечается в [6], процессы развития таких информационных систем создают особую виртуальную среду для научных исследований. В этих процессах можно выделить три логически связанные компоненты:

- 1) развитие программно-технических средств поддержки исследований (новый инструментарий);
- 2) использование новых инструментальных средств для совершенствования методов работы исследователей и их профессиональных взаимодействий (новые практики);
- 3) повышение эффективности организационных форм научно-исследовательской деятельности посредством использования нового инструментария и новых методов работы (новая форма организации сообщества исследователей).

В данной работе на примере виртуальной рабочей среды для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в области активной сейсмологии проиллюстрировано использование всех перечисленных выше механизмов для организации эффективного взаимодействия и доступа к научной информации исследователей, работающих в конкретной предметной области.

Постановка задачи

Активная сейсмология является новым направлением в геофизике, в котором для изучения строения земной коры и исследования геодинамических процессов в зонах землетрясений и вулканов используются управляемые источники сейсмических волн — мощные сейсмические вибраторы, гидромеханические и

электромагнитные импульсные источники [1]. В последние годы к методам активной сейсмологии так же относят экспериментальные работы, в которых регистрируется сейсмическое поле природных источников по технологии, определенной конкретной задачей геофизики, например сейсмозмиссионная томография вулканических структур с использованием сейсмического шума из активной области вулкана. В 2010 г. был проведен уникальный эксперимент по регистрации сейсмического шума методом «сейсмической антенны» в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Последние три десятилетия работы по активной сейсмологии проводятся в России, Японии, Китае, США, европейских странах. В России в рамках экспериментальных исследований проводился вибросейсмический мониторинг литосферы в Алтае-Саянском регионе, Байкальской рифтовой зоне и Таманской грязевулканической провинции. В Японии с вибросейсмической системой ACCROSS проводится мониторинг сейсмоопасных и разломных зон земной коры. В области активной сейсмологии накоплен большой объем информации по всем составляющим метода, включая вопросы теории метода, создания управляемых источников, результатов экспериментальных работ, методов математического моделирования, который представлен в разрозненных источниках – статьях, монографиях, отчетах, на сайтах институтов и др.

Разработанная авторами доклада информационная система обеспечивает структурирование этой информации и доступ к ней в рамках одного Интернет-ресурса для комплексной поддержки научных исследований в области активной сейсмологии.

НИС «Активная сейсмология» существенно расширила круг исследователей, использующих экспериментальные данные для развития методов обработки и интерпретации вибросейсмических данных, математического моделирования и т. п.

Управление экспериментальными данными

ИВМиМГ СО РАН участвует в экспериментах по активному мониторингу ли, начиная с 1995 г. В результате этой работы был накоплен уникальный архив данных полевых экспериментов, включающий архив файлов волновых форм и сопутствующей информации (тип сейсмического источника, параметры излучаемого им сигнала, параметры регистратора, географические координаты источника и регистратора и т. д.). Для доступа к этому экспериментальному материалу была разработана информационно-вычислительная система (ИВС) «Вибросейсмическое просвечивание Земли» [2]. ИВС обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- получение из базы данных подробной информации по любому из проведенных экспериментов;
- индексный и параметрический поиск сейсмотрасс одновременно по 18 параметрам вибропросвечивания;
- автоматическое построение по результатам поиска интерактивных карт с обозначенными на них сейсмическими источниками и регистраторами;
- интерактивный анализ сейсмических сигналов во временной, частотной, частотно-временной и пространственной областях. Анализ осуществляется в режиме онлайн с отображением результатов в веб-браузере пользователя.

По своей структуре и функциям ИВС «Вибросейсмическое просвечивание Земли» в рамках современной терминологии может быть отнесена к центрам научных данных. Стиль работы в таких центрах состоит в посылке запросов приложениям, выполняемым на сервере, и получении ответов, а не в массовом копировании необработанных данных на локальный компьютер для дальнейшего анализа [9].

Вычислительная подсистема представляет собой приложение, выполняемое непосредственно в среде операционной системы сервера. Для обеспечения необходимого для on-line режима быстрогодействия при обработке данных ресурсоемкие вычислительные процедуры могут выполняться программно-аппаратным модулем на основе архитектуры CUDA. В модуле применяются графические процессоры (GPU) и математические библиотеки компании NVIDIA [3]. За счет многоядерной параллельной архитектуры GPU превосходят по быстродействию процессоры общего назначения (CPU) на 1 – 3 порядка при выполнении большинства вычислительных процедур.

Концептуальные основы, заложенные при разработке ИВС, позволяют создавать аналогичные системы управления экспериментальными данными в любой предметной области.

Предоставление в режиме онлайн экспериментальных данных и предлагаемые сервисы ИВС являются привлекательной особенностью предлагаемой научно-информационной системы.

На наш взгляд, активное формирование круга пользователей Интернет-ресурса «Активная сейсмология» происходит благодаря заинтересованности коллег в доступе к данным полевых экспериментов.



Рис. 1. Главная страница системы и работа с данными экспериментов

Управление геопространственными данными

Во многих научных областях (геофизика, экология и т. д.) исследователи имеют дело с пространственно обусловленными данными или геопространственными данными. Поэтому архитектура ИВС должна предусматривать подсистему управления геоданными и картографическую подсистему.

Большинство современных СУБД, как коммерческих, так и свободно распространяемых, поддерживают класс пространственных данных непосредственно или с помощью специальных расширений. Картографические сервисы, в частности web-сервисы, до недавнего времени строились преимущественно на основе специализированного серверного ПО, позволяющего публиковать в сети Интернет карты, сопровождаемые базовым ГИС-инструментарием. Однако, в последние годы в Интернете все большее распространение получают гибридные ГИС. В таких системах геоданные из прикладной базы данных интегрируются с картографическим сервисом, предоставляемым специализированным web-сервером. На сегодняшний день наиболее развитым картографическим web-сервисом является Google Maps компании Google [4, 5]. Сервис базируется на данных дистанционного зондирования (спектрозональные снимки со спутников Landsat, SPOT, Quickbird с разрешением до 0.68 м), совмещенных с топографическими картами в проекции Меркатора. Компания Google предоставляет пользователям интерфейс Google Maps API в виде классов объектов JavaScript для генерации карт и нанесения на них собственных маркеров, контуров, а также готовых слоев в формате KML. Данные для отображения могут находиться как непосредственно в коде web-страниц, так и во внешних XML и KML файлах. Схема взаимодействия сервера ИВС, сервера Google Maps и клиентского браузера показана на рис. 2.

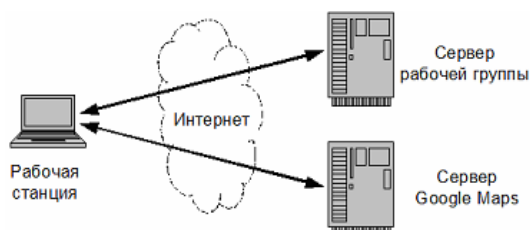


Рис. 2. Структура гибридной ГИС

Управление публикациями и организация социальной сети

Как уже отмечалось, Интернет-ресурс, обеспечивающий функционирование виртуальной рабочей среды, основан на принципах веб 2.0, согласно которым пользователи принимают непосредственное участие как в создании контента (содержимого ресурса), так и в организации научных коммуникаций. Для создания подобных ресурсов существует специализированное серверное программное обеспечение, называемое системами управления содержимым — CMS (Content Management System).

В результате сравнительного анализа различных систем управления содержимым было решено строить Интернет-ресурс на базе CMS Joomla [5]. Данная CMS распространяется по лицензии GNU/GPL (свободное программное обеспечение) и ориентирована в первую очередь на создание сайтов электронных публикаций. Для работы Joomla требуется PHP-интерпретатор и СУБД MySQL – также свободное программное обеспечение. Наличие большого количества дополнительных Joomla-компонентов позволяет расширять функциональность ресурса в соответствии с требованиями современных информационно-коммуникационных технологий. Ниже перечислены дополнительные Joomla-компоненты, которые были использованы при создании Интернет-ресурса.

Community Builder — компонент для управления пользователями и организации связей между ними, используется для создания и поддержки онлайн-сообществ. Основные функции компонента:

- расширенное управление регистрацией пользователей, создание дополнительных полей в профайле, например, списка опубликованных статей;
- организация контактов между пользователями, создание рабочих групп;
- поддержка систем личных сообщений (PMS), почтовых рассылок, блогов пользователей.

J!Research — компонент для организации на сайте библиографического каталога научных публикаций. Имеется возможность вставлять в материалы сайта ссылки на записи каталога и автоматически генерировать список литературы. Компонент позволяет пользователям добавлять записи как через веб-форму, так и импортировать библиографическую базу данных из bib-файла. Предусмотрен импорт/экспорт из форматов BibTeX, MODS, RIS. Компонент обеспечивает поиск, сортировку, выборку по любому из полей: автор, издание, год публикации и т. п.

JComments – компонент позволяет пользователям не только оставлять комментарии к различным материалам, размещенным на сайте, но и разворачивать обсуждение в формате форума.

Mime Tex – компонент для включения в размещаемые на сайте материалы математических выражений в формате LaTeX.

Attachments – компонент для загрузки и публикации материалов в формате PDF. Таким образом, пользователь может в онлайн-редакторе набрать часть статьи или краткую аннотацию, а полный текст статьи или дополнительные материалы «прикрепить» в виде файла PDF.

Пользователи Интернет-ресурса «Активная сейсмология» имеют возможность в интерактивном режиме публиковать статьи и другие материалы в одном из следующих разделов:

- вибросейсмические технологии;
- математическое моделирование;
- экспериментальная геофизика;
- вулканология и сейсмология;
- технические средства;
- информационные технологии.

Структурная схема НИС «Активная сейсмология» приведена ниже.

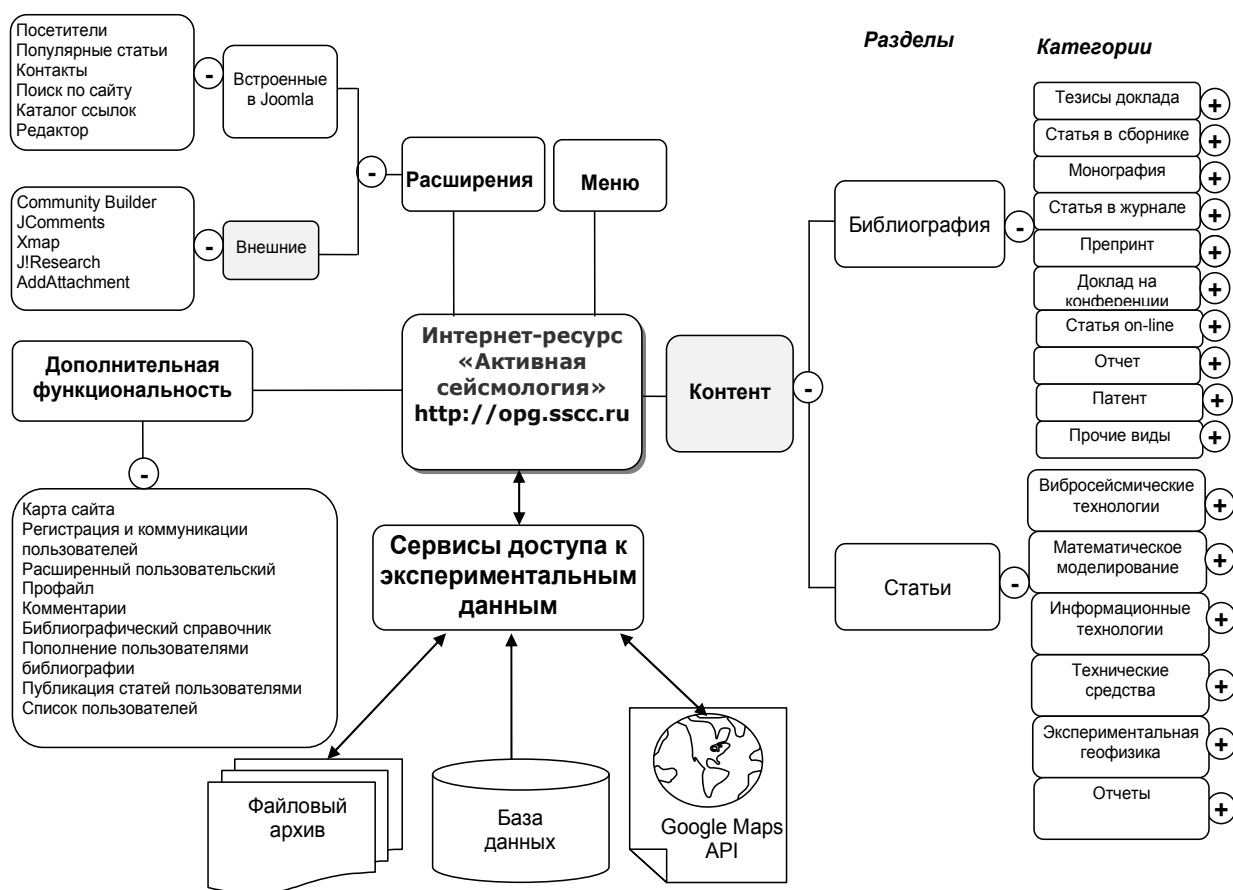


Рис. 3. Структурная схема НИС «Активная сейсмология»

Актуальность, полнота, достоверность происхождения документов

Основными пользователями НИС «Активная сейсмология» являются специалисты, работающие в вибросейсмической тематике или смежных областях. На сегодняшний день более 40 зарегистрированных участников публикуют свои статьи и участвуют в обсуждении работ коллег. Можно отметить, что в этом списке представлены все основные российские научные учреждения, работающие в данном направлении, что позволит обеспечить полноту и актуальность предоставляемой информации.

Особенно важным представляется участие в работе НИС ученых, которые являются основателями метода активной сейсмологии. Опубликованные ими статьи дают полное представление о теоретических основах вибросейсмического метода.

В разделе «Математическое моделирование» опубликован ряд работ, в которых приводятся результаты обработки данных вибросейсмических экспериментов, сравниваются результаты численного и натурного экспериментов.

Пользователями НИС являются не только ученые институтов СО РАН, но и ДВО РАН, Камчатской геофизической службы, КубГУ, ИФЗ РАН и т. д.

В разделах «Вулканология и сейсмология» и «Экспериментальная геофизика» представлены результаты исследований, многие из которых напрямую не связаны с методом активной сейсмологии. Общим является предмет исследования — сейсмичность Байкальской рифтовой зоны, Таманской грязевулканической провинции, вулкана Эльбрус и т.п.

НИС «Активная сейсмология» поддерживает два вида ввода данных: интерактивный ввод данных пользователями и административный ввод данных. Для интерактивного ввода проблема достоверности происхождения информации решается ограничением ввода документов только аутентифицированными пользователями. Администрация Интернет-ресурса оставляет за собой право удалять материалы, не соответствующие объявленной тематике.

Сравнение с зарубежными и российскими аналогами

Исторически одним из первых научных Интернет-ресурсов, имеющих функции социальной сети, может считаться научная библиотека Public Library of Science – PloS (www.plosone.org), созданная в 2003 году в США в ответ на отказ издательств научных журналов открыть свои архивы. Одному из основателей этого ресурса принадлежит характерное высказывание: «Наука развивается не только потому, что

ученые делают эксперименты, но и потому, что они обсуждают эти эксперименты». Российским аналогом проекта является Соционет (www.socionet.ru), который на основе открытых стандартов организует процессы обмена знаниями в области гуманитарных наук.

Примером масштабной научно-образовательной сети, использующей самые современные Интернет-технологии может служить ресурс www.academia.edu. В последние несколько лет предпринимаются попытки создания аналогичных ресурсов, ориентированных на российских пользователей: www.scipeople.ru, www.science-community.org/ru, www.allscience.ru и другие.

Основным отличием научной информационной системы «Активная сейсмология» от перечисленных выше «глобальных» ресурсов является её ориентированность на конкретную область исследований. Мы полагаем, что находясь в пространстве узкоспециализированной научной сети, пользователи с большей вероятностью могут рассчитывать на налаживание связей и общение с коллегами, на получение комментариев и оценок от экспертов в данной области. Чем менее публично сообщество, тем сильнее вовлеченность участников – истина, хорошо известная исследователям социальных сетей.

Литература

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / отв. ред. Г. М. Цибульчик. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Издательства СО РАН, 2004.
2. Григорюк, А. П. Управление данными вибро-сейсмического мониторинга / А. П. Григорюк, Л. П. Брагинская // Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия: сб. материалов Междунар. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2007». – Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2007.
3. CUDA Zone [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nvidia.ru/object/cuda_home_new_ru.html.
4. Google Maps API Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.google.com/apis/maps/documentation>.
5. Григорюк, А. П. Опыт веб-картографирования на основе сервиса Google Maps / А. П. Григорюк, Л. П. Брагинская // Мониторинг окружающей среды, геоэкология, дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия: сб. Междунар. науч. конгресса ГЕО-Сибирь-2008. – Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2008.
6. Лопатенко, А. С. Современные научные информационные системы. Перспективы использования. – Режим доступа: <http://derpi.tuwien.ac.at/~andrei/papers/dl2001-1.htm>.
7. Паринов, С. И. Онлайн-будущее науки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://infosoc.ru/2007/thes/part1/Parinov.pdf>.
8. Медведев, М. М. Наука 2.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.strf.ru/science.aspx?CatalogId=222&d_no=13726.
9. Scientific Data Management in the Coming Decade, J. Gray, D.T. Liu, M. Nieto-Santisteban, A. Szalay, D. DeWitt and G. Heber // SIGMOD Record. – Vol. 34. – № 4. – Dec. 2005.

Информация об авторах

Григорюк Андрей Павлович – научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, and@opg.sgcc.ru

Grigoryuk Andrey Pavlovich – researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

Брагинская Людмила Петровна – ведущий программист, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, ludmila@opg.sgcc.ru

Braginskaya Ludmila Petrovna – leading programmer at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ПРОТЕКАНИЯ В РАЗВЕТВЛЁННЫХ КАНАЛАХ

Е. Э. Гуммель, Ю. Н. Захаров

UNSTEADY FLOW PROBLEM IN BRANCHED CHANNELS

E. E. Hummel, Y. N. Zakharov

В данной статье приводится метод решения нестационарной задачи о движении однородной вязкой несжимаемой жидкости в разветвляющемся канале, вызванном разностью давлений на его входах-выходах. Метод основан на использовании аппроксимации решаемой системы на входах-выходах канала для вычисления значений скоростей и многошаговой итерационной схемы для нахождения давления внутри области решения. Приводятся результаты численного решения двухмерных и трехмерных задач.

This article is devoted to a method for solving the unsteady problem of a homogeneous incompressible viscous fluid motion in a branching channel caused by pressure difference on its entrances and exits. The method is based on the use of the solved system approximation on channel entrances and exits for evaluating velocities and multi-step iterative scheme for finding the pressure within the solution area. Also numerical solution results of two- and three-dimensional problems are shown.

Ключевые слова: однородная вязкая несжимаемая жидкость, система уравнений Навье-Стокса, нестационарная задача, перепад давлений, течение в разветвляющемся канале.

Keywords: homogeneous viscous incompressible fluid, Navier-Stokes equations, unsteady problem, pressure drop, flow in a branching channel.

Практически важными являются задачи о движении воздуха в системах вентиляции в зданиях, подземных сооружениях (шахтах, метро) и т. п. Эти задачи, в силу малости скоростей движения среды и фактической ее несжимаемости, можно моделировать движением вязкой однородной несжимаемой жидкости, когда источником движения является перепад давления на концах разветвленного канала. Детальный анализ таких течений важен, например, при оценке загазованности отдельных участков угольных шахт. Поэтому целью настоящей работы является построение метода решения нестационарной задачи о движении в канале однородной вязкой несжимаемой жидкости при задании давления на входе и выходе канала.

Традиционно в задачах о течении в каналах однородной вязкой несжимаемой жидкости (система уравнений Навье-Стокса) рассматриваются две постановки задач: в первой, более популярной, на твердых стенках задается условие прилипания, а на участках втекания и вытекания – векторы скорости. Этому посвящено достаточно большое число работ (см., например, обзоры в [1], [2]) Вторая постановка заключается в задании на участках втекания-вытекания давления, а не скоростей. То есть движение жидкости в области протекания осуществляется за счет разности давлений. Таким образом, эти задачи приходится решать в формулировке «скорость-давление», а не в формулировке «функция тока-вихрь». В работе [3, с. 78 – 92] показано, что для существования и единственности решения нестационарной задачи, кроме задания давления на участках втекания-вытекания, необходимо задать только одну из компонент скорости так, чтобы вектор скорости на границе втекания-вытекания был ей перпендикулярен. Однако в этом случае отсутствие значения второй компоненты вектора скорости не позволяет без дополнительных условий на нее построить процесс численного решения таких задач. Обычно численно решаются задачи протекания в каналах с параллельными осям координат прямыми границами и углами (см. [4, с. 203 – 207; 5, с. 259 – 270]). В этом случае на входе и выходе задаются «естественные» краевые условия на скорости вида $v = 0$, $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ ($u = 0$, $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$), которые позволяют построить алгоритмически замкнутый численный

метод решения. В этом случае условие на производную для одной из компонент вектора решения является прямым следствием условия $v = 0$ ($u = 0$). Однако такое «простое» определение скоростей на границе не всегда возможно. Дело в том, что эти условия на вторую компоненту являются, вообще говоря, «лишними» и, для того чтобы краевая задача с ними имела решение, необходимо, чтобы они были естественным образом согласованы с решением задачи, сформулированной без таких дополнительных условий.

В настоящей работе предложен метод решения поставленной задачи, использующий решаемую систему уравнений для определения значения вектора скорости на границах канала.

1. Рассмотрим двухмерную задачу о протекании вязкой однородной несжимаемой жидкости в канале с заданным перепадом давления на входе и выходе:

$$\begin{aligned} V_t + (V \cdot \nabla)V + \nabla p - \nu \Delta V &= 0, \quad (x, t) \in Q_T, \\ \operatorname{div} V &= 0, \quad (x, t) \in Q_T, \\ V(x, 0) &= V_0(x), \quad x \in \Omega, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V(x, t) &= 0, \quad (x, t) \in S_1, \\ p(x, t) &= p_0(x, t), \quad (x, t) \in S_2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$V \cdot \vec{\tau} = 0, \quad (x, t) \in S_2, \quad (3)$$

где $V = (u(x_1, x_2, t), v(x_1, x_2, t))$ – вектор скорости, $p = p(x_1, x_2, t)$ – давление, $\nu > 0$ – коэффициент кинематической вязкости, $x = (x_1, x_2)$, $t \in [0, T]$ – время, Ω – область решения (см. рис. 1), $Q_t = \Omega \times [0, T]$, $S_1 = \gamma_1 \times [0, T]$, $S_2 = \gamma_2 \times [0, T]$, γ_1 – непроницаемые твердые стенки, γ_2 – участки протекания, $\vec{\tau}$ – касательный вектор к границе γ_2 .

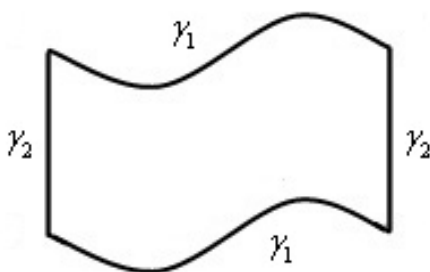


Рис. 1. Область решения

Равенства (3) означают, что вектор скорости V перпендикулярен границам γ_2 , но значение его величины не задано. Это обстоятельство является одной из основных трудностей при решении рассматриваемой задачи.

Для численного решения нестационарной системы уравнений (1) с краевыми условиями (2), (3) построим в области Ω разнесенную прямоугольную и в общем случае неравномерную сетку Ω_h , согласованную с границей $\Gamma = \gamma_1 \cup \gamma_2$ [6].

Будем решать задачу (1)-(3) с помощью трехэтапной схемы расщепления [7]:

$$\frac{\tilde{V} - V^n}{\tau} = -(\tilde{V} \nabla) \tilde{V} - \nu \Delta V; \quad (4)$$

$$-\Delta p = -\frac{\operatorname{div} \tilde{V}}{\tau}; \quad (5)$$

$$\frac{V^{n+1} - \tilde{V}}{\tau} = -\nabla p, \quad (6)$$

где τ – шаг по времени.

На первом этапе решается уравнение движения (4) без градиента давления. На втором – уравнение Пуассона для давления (5). И на третьем этапе для поправки скорости решается уравнение (6), данными для которого служат решения уравнений (4), (5).

На Ω_h методом контрольного объема аппроксимируем уравнение (4) разностной схемой 2-го порядка по пространству. Для решения необходимо задать скорость на входе и выходе. Поэтому для замыкания системы и реализации какого-либо метода дробных шагов (например, метода стабилизирующей поправки) аппроксимируем уравнение (4) на границах протекания внутри области решения, заменяя производные односторонними разностями первого порядка аппроксимации. В итоге матрица коэффициентов системы для прогонки в перпендикулярном границе γ_2 направлении будет иметь следующую структуру:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & \dots & & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & & & & \vdots \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \ddots & & & \\ \vdots & \ddots & a_{43} & \ddots & \ddots & & & \\ & & & \ddots & \ddots & & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & a_{N-3N-2} & \ddots & \vdots \\ & & & & & \ddots & a_{N-2N-1} & 0 \\ \vdots & & & & 0 & a_{N-1N-2} & a_{N-1N-1} & a_{N-1N} \\ 0 & \dots & & \dots & 0 & a_{NN-2} & a_{NN-1} & a_{NN} \end{pmatrix}$$

В первой и последних строках стоят три не нулевых элемента, что не позволяет использовать для её обращения трёхдиагональную прогонку. Исключая их с помощью преобразований Гаусса, мы получим систему с трёхдиагональной матрицей и уже можем применять обычную скалярную прогонку.

Чтобы задать краевое условие для давления на твердых стенках, выразим из уравнений движения производную по нормали $\frac{\partial p}{\partial n}$ и получим, таким образом, для уравнения Пуассона (5) смешанную краевую задачу.

После аппроксимации на Ω_h обычным образом получившуюся краевую задачу мы будем иметь систему линейных алгебраических уравнений, которую необходимо решать на каждом шаге по времени. Т. к. в процессе решения (5) краевые условия не изменяются, то для приближённого решения уравнения Пуассона мы использовали многоступенчатую итерационную схему, которая в самосопряженном случае является чебышевской [8], но также может быть использована и когда матрица системы несамосопряженная. Еще одним достоинством этой схемы является то, что она устойчива к неточному заданию входных параметров. Задав некоторым образом в начале итерационного процесса входные данные необходимые для построения многоступенчатой схемы, можно определить оптимальный набор итерационных параметров и использовать его в дальнейшем без изменений.

2. Для проверки работоспособности предлагаемого метода решения нестационарного уравнения Навье-Стокса была рассмотрена задача о течении в разветвляющемся канале (рис. 2). Все результаты приведены при $\nu = 0.01$.

На входах в канал задано давление $p_i, i = 1, \dots, 6$ и нулевая касательная составляющая скорости к границе: на горизонтальных участках $u = 0$, на вертикальных – $v = 0$. На твердых стенках скорость задается равной нулю.

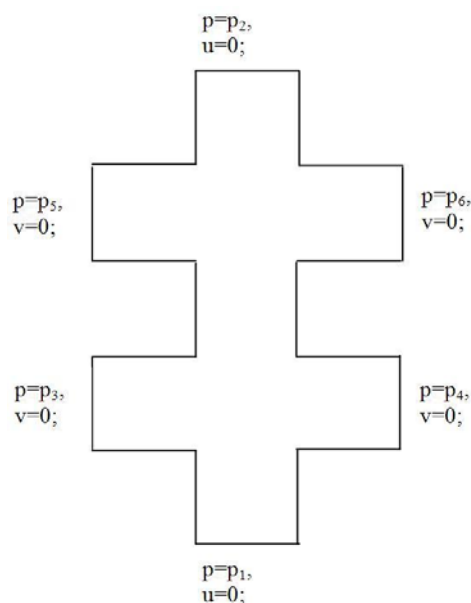


Рис. 2. Разветвляющийся канал

На рис. 3 показана динамика течения до установления, когда на границах задано стационарное давление $p_1 = 0.1$, $p_2 = 0$, $p_3 = 0.0953$, $p_4 = 0.1$, $p_5 = 0.1$, $p_6 = 0.1$. Как видно из рисунка, при установлении течения вблизи верхней стенки нижнего левого ответвления возникает постепенно увеличивающийся вихрь. При выходе на стационарное течение он занимает почти весь проход, при этом на границе протекания некоторые линии тока направлены внутрь канала, некоторые – наружу.

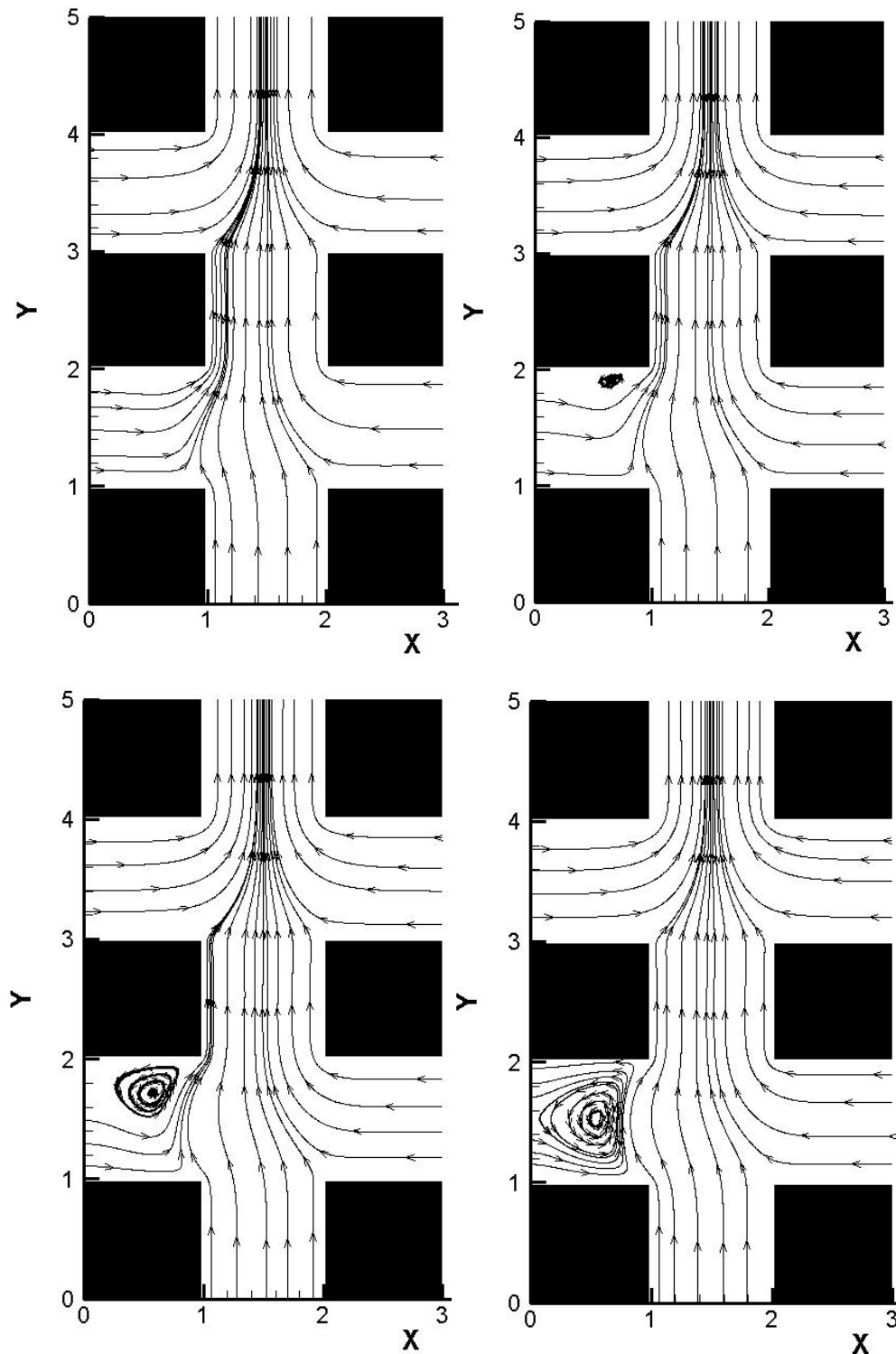


Рис. 3. Течение в канале, $p_3 = 0.0953$, моменты времени $t = 7,98; 12; 15,96; 19,68$, соответственно

Далее приведены результаты расчётов трёхмерного течения в Т-образном канале, когда на входах-выходах задано давление. Полученные картины установившихся течений приведены на рис. 4. Для всех

случаев значение давления слева равно 0.1 ($p_{LEFT} = 0.1$), справа равно нулю ($p_{RIGHT} = 0$). Значение давления на верхнем входе (p_{TOP}) изменялось от 0.1 до 0.03.

На рис. 4а изображено течение при $p_{TOP} = p_{LEFT} = 0.1$. В этом случае жидкость поступает в канал через верхний и левый входы, выходя затем наружу через правую границу протекания, где $p_{RIGHT} = 0$.

На рис. 4б показано изменение течения при уменьшении давления на верхнем входе ($p_{TOP} = 0.03$). Как видно из рисунка, поток жидкости, поступающей в канал, разделяется на две части и выходит наружу как через левую границу, так и через верхнюю.

В третьем же случае (рис. 4в), когда давление p_{TOP} на верхнем ответвлении канала равно 0.051 ($p_{TOP} = 0.051$), течение из верхнего входа не проникает в нижнюю часть. Т. е. течение жидкости из левого входа в правый выход служит препятствием для движения из верхнего отверстия канала. Т. о. получена схожая с двумерным случаем картина течения, когда из одного рукава разветвлённого канала жидкость не проходит в другие его части, т. е. там происходит его запирание.

Т. о., предложенный метод решения нестационарных задач для системы уравнений Навье-Стокса, когда источником движения является разность давлений на границах канала, позволяет решать двухмерные и трёхмерные задачи, обнаруживая не тривиальные течения.

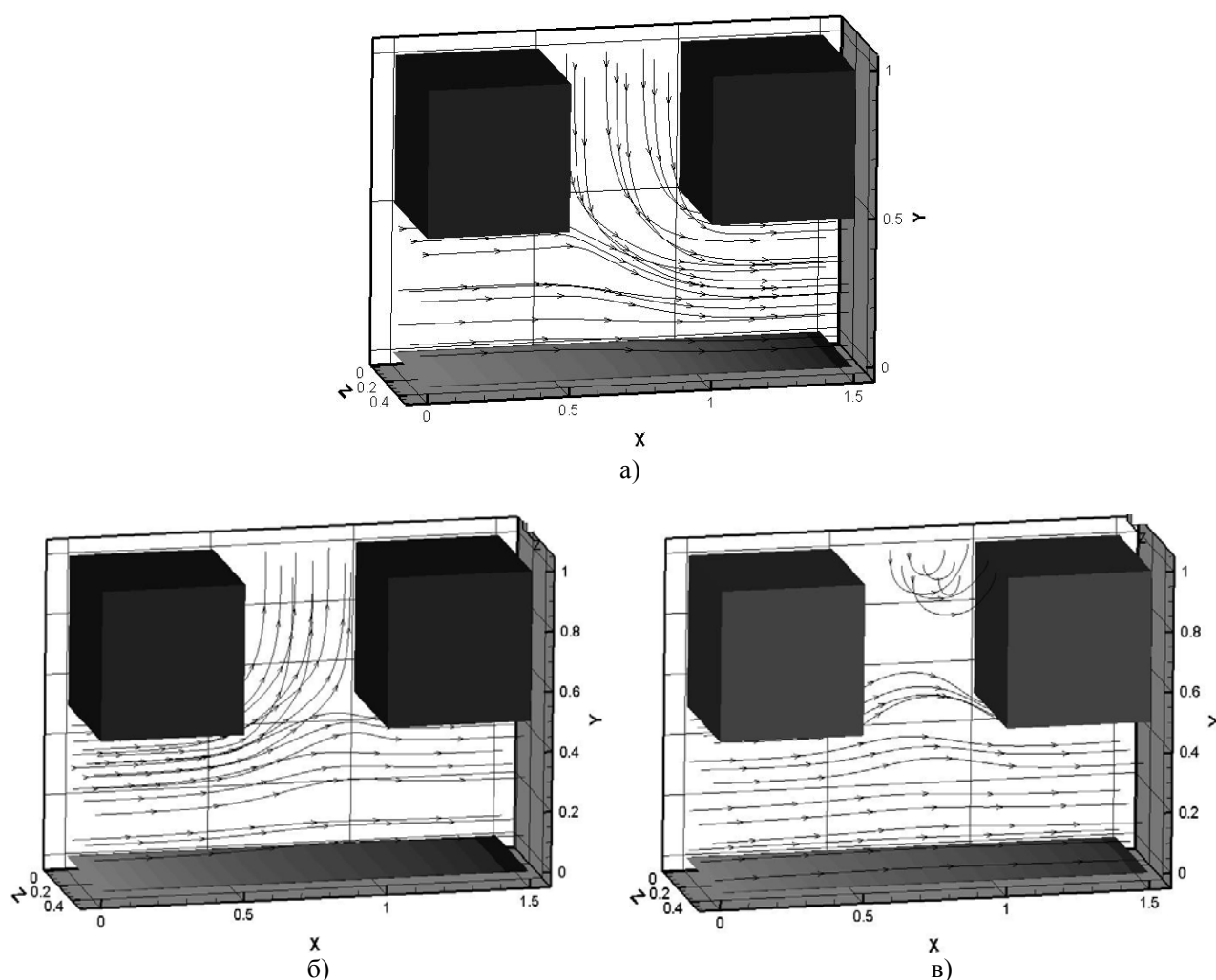


Рис. 4. Течение в Т-образном трехмерном канале
 $p_{TOP} = 0.1$, $p_{TOP} = 0.03$, $p_{TOP} = 0.051$ соответственно

Литература

1. Пасконов, В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. И. Полежаев, Л. А. Чудов. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
2. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 612 с.
3. Рагулин, В. В. К задаче о протекании вязкой жидкости сквозь ограниченную область при заданном перепаде давления или напора / В. В. Рагулин // Динамика сплошной среды: сб. научн. тр. – Новосибирск, 1976. – Вып. 27.
4. Кузнецов, Б. Г. Численное исследование течения вязкой несжимаемой жидкости в каналах при заданных перепадах давлений / Б. Г. Кузнецов, Н. П. Мошкин, Ш. Смагулов // Численные методы динамики вязкой жидкости: сб. ИТПМ СО АН СССР. – Новосибирск, 1983.
5. Moshkin, N. Steady viscous incompressible flow driven by a pressure difference in a planar T-junction channel / N. Moshkin, D. Yambangwi // Intern. J. of Comput. Fluid Dyn. – 2009. – Vol. 23. – № 3.
6. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
7. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О. М. Белоцерковский. – М.: Наука, 1984. – 520 с.
8. Захаров, Ю. Н. Градиентные итерационные методы решения задач гидродинамики / Ю. Н. Захаров. – Новосибирск: Наука, 2005. – 239 с.

Информация об авторах

Гуммель Евгений Эрнстович – аспирант, ассистент кафедры вычислительной математики КемГУ, jade_taurus@mail.ru

Hummel Evgenij Ernstovich – post-graduate student, Assistant at the Department of Computational Mathematics of KemsU.

Захаров Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой вычислительной математики, КемГУ, т. 8(384-2) 54-27-70, zyn@kemsu.ru

Zakharov Yuriy Nikolaevich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Computational Mathematics of KemsU.

УДК: 502.3

**ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ,
ГИС-АНАЛИЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ
НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОГО АКАДЕМГОРОДКА**

**Н. Н. Добрецов, И. Д. Зольников, Н. В. Глушкова, В. А. Лямина,
К. С. Соколов, Н. И. Макунина, В. В. Смирнов, Д. В. Пчельников**

**TECHNOLOGIES OF NATURAL-ANTHROPOGENIC ECOSYSTEMS COMPUTER MAPPING AND
MODELLING (THE EXAMPLE OF NOVOSIBIRSK ACADEMGORODOK)**

**N. N. Dobretsov, I. D. Zolnikov, N. V. Glushkova, V. A. Lyamina,
K. S. Sokolov, N. I. Makunina, V. V. Smirnov, D. V. Pchelnykov**

Для Новосибирского Академгородка создана база геоданных, включающая основные природные и техногенные объекты территории. Предложена комплексная методика картографирования и моделирования мозаичных природно-антропогенных экосистем с использованием методов ГИС и ДЗ.

The geodatabase, including the territory's main natural and technogenic objects, has been created for Novosibirsk Akademgorodok. The complex methodics for mapping and modeling of mosaic natural-anthropogenic ecosystems with GIS and RS is suggested.

Ключевые слова: природно-антропогенная система, база геоданных, гетерогенные ландшафты.

Keywords: natural-anthropogenic system, geodatabase, heterogenous landscapes.

Характерной чертой Новосибирского Академгородка является диффузная застройка, «основой которой является взаимопроникновение жилых и рабочих кварталов и больших массивов нетронутых природных насаждений» [6], что позволяет называть его экополисом в современном его понимании по [2]. Таким об-

разом, город-лес или экополис по [2] представляет собой гетерогенную природно-антропогенную систему, для которой присуще мозаичное пространственное распределение разных типов ландшафта. Поэтому для исследования экосистем Академгородка используется комплексная технология геоинформационного моделирования сложных природно-антропогенных систем, которая разработана на основе технологии выделения гетерогенных природно-территориальных комплексов (ПТК) [4, с. 126 – 131]. Это позволяет не только картографировать, но и оценивать вклад различных типов природных и антропогенных объектов (в зависимости от их процентного соотношения) в ПТК. Кроме того, с использованием разработанной технологии возможно проводить моделирование изменений пространственной структуры природно-антропогенных экосистем.

Создание базы геоданных

На первом этапе формирования базы геоданных создавалась географическая основа (подложка) ГИС для изучаемой территории. В качестве такой основы выбраны снимки высокого разрешения Quickbird и детальные топографические материалы масштаба 1:10000. Для разрешения противоречия между требованиями секретности и требованиями детальности исследований была произведена перекодировка геоданных на снимок среднего разрешения Landsat (рис. 2.1), что позволило получить искажение абсолютной геопривязки тематических слоёв с сохранением относительных пропорций и расстояний внутри выбранного участка исследований. Космоснимки высокого разрешения разделены на равные фрагменты (фрэймы – frame), каждый из которых покрывает территорию 2 x 2 км. Общее покрытие состоит из 100 фрэймов (10x10 фрагментов). По космоснимкам Quickbird проведена векторизация ряда объектов. В их числе: 1) транспортные коммуникации: асфальтовые и грунтовые дороги, пешеходные и велосипедные дорожки, асфальтированные площадки и т. п. (полигональный слой); 2) строения: жилые, хозяйственные, административные и другие здания (полигональный слой); 3) гидрография: Новосибирское водохранилище, озера, старицы, пруды, протоки, реки и ручьи (полигональный слой); 4) улицы и основные транспортные магистрали (линейный слой); 5) растительность (полигональный слой); 6) зонирование территории по функциональному значению (полигональный слой); 7) изолинии высот (линейный слой). В результате получен набор тематических слоёв (как векторных, так и растровых), составляющих географическую основу ГИС.

После выполнения работ по векторизации следовал этап по наполнению объектов базы геоданных атрибутивной информацией. Классификация объектов и дополнительная атрибутивная информация необходима для пространственного анализа (построения плотностных сеток и определения антропогенной нагрузки на территорию). Исходные данные – изолинии высот были оцифрованы по схеме масштаба 1:10000. Эти данные были проверены топологически. По космическим снимкам был оцифрован слой полигональной гидрографии (Новосибирское водохранилище, озера, старицы, пруды, протоки) и заполнена атрибутивная информация абсолютной высоты. Была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) Академгородка и прилегающей территории. ЦМР позволяет не только четко позиционировать наблюдения по абсолютным отметкам, автоматически строить геоморфологические профили, но и создавать различные модели местности, ориентированные на решение экологических задач. Созданная географическая основа для ЭКОГИС АКАДЕМГОРОДКА далее передавалась тематическим специалистам: геологам, почвоведом, ботаникам, зоологам в виде тематических векторных и растровых слов для программных пакетов ARCVIEW и ARCGIS. Для хранения географических данных и работы с ними используется файловая база геоданных ArcGIS 9.3. Этот формат имеет ряд преимуществ по сравнению с персональной базой геоданных и шейп-файлами. Общий размер файла с данными и файла-проекта – около 10 МБ.

В случае если тематические специалисты работают с ArcGIS более ранних версий или с другими ГИС – возможен экспорт из базы геоданных практически в любой ГИС-формат. Актуальные данные располагаются на сервере в виде WMS (Web Map Services) и доступны как для просмотра в браузере, так и для добавления слоёв в карту любой ГИС, которая может работать с WMS-слоями. Для демонстрационных целей возможно создание электронной карты в виде исполняемого файла (*.exe), состоящего из программной оболочки (просмотрщика) и собственно электронной карты. С такой электронной картой можно работать на компьютерах под управлением Windows или на мобильных устройствах под управлением Windows Mobile и Apple iOS. При этом данные защищены от несанкционированного распространения. Доступ пользователей к пространственной информации также может регулироваться установкой пароля и ограничением времени использования карты. Получившийся файл можно пересылать по электронной почте, добавлять в презентации, выкладывать на сайт для скачивания, распространять на CD и других электронных носителях. Для использования такой электронной карты не требуется какого-либо дополнительного программного обеспечения или специальных навыков ГИС-специалиста. Электронная карта Академгородка (с растром) занимает примерно 200 МБ.

Кроме того, на территорию Новосибирского Академгородка разработан ГИС-атлас, доступный через Интернет по протоколу WMS. Для полноценного описания территории недостаточно просто создания картографических материалов. Ко всем созданным данным необходимо заполнить соответствующие метаданные – описывающие данные, так например: авторство, права доступа, дата создания, доступные но-

сители и пр. [5, с. 1 – 6]. Кроме того необходимо создание некартографических материалов, также описывающих эту территорию. В рамках работы по проекту проводится апробация созданного профиля метаданных, позволяющего описать сущность ГИС-атласа. Этот профиль в дальнейшем может быть использован для создания ГИС-атласа любой другой территории. ГИС-атлас предполагает три уровня иерархии: слой, карта и непосредственно атлас. Между картографическими сущностями возможны множественные связи: так карта может содержать несколько слоев, а один слой может входить в состав нескольких карт; атлас содержит несколько карт, а одна карта может входить в состав нескольких атласов. Кроме того ГИС-атлас может содержать и некартографические материалы – различные статьи, приложения и др., для которых, также как и для картографических материалов должны быть описаны метаданные. Благодаря тому, что используемый профиль метаданных основан на стандарте ISO:19115, данные подготовленного ГИС-атласа могут быть использованы и в других проектах, как построенных по той же технологии, так и любой другой системе, которая имеет механизм работы с метаданными поддерживающей стандарт ISO:19115 (например, российский портал «ГеоМета»).

В настоящее время по Академгородку подготовлены и доступны по протоколу WMS: почвенные карты, карты состояния лесов, ряд зоологических и экологических карт, а также целый ряд слоев описывающих территориальное деление и инфраструктуру Академгородка. Для всех этих ресурсов заполняются метаданные, для того чтобы регламентировать получение доступа к этим данным, а также осуществлять полноценный поиск по ресурсам. Помимо непосредственно метаданных для проекта Академгородок, не менее важным является инструмент создания web-картографических наборов, разработанный в ИГМ СО РАН. Еще одной немаловажной функцией работы со слоями разных серверов-источников является то, что склейка графических изображений и атрибутивных данных одновременно запрошенных слоев осуществляется непосредственно системой управления WMS ресурсами. Следующим этапом в разработке программного обеспечения по проекту Академгородка будет реализация открытых протоколов обмена метаданных для интеграции с различными каталогами РАН (например, с ГИС порталом разработанным ИВМ СО РАН).

Картографирование природных объектов

При картографировании лесного покрова Академгородка, использовался анализ и сопоставление двух космических снимков высокого разрешения QuickBird: позднеосеннего и летнего. Рассмотрим разработанную технологию картографирования на примере изучения лесной растительности Центрального Сибирского Ботанического сада СО РАН [3, с. 83 – 91]. Осенний снимок использовался для выделения хвойных деревьев, поскольку виды лиственных деревьев уже сбросили листву, а хвойные так и остались зелеными. Была разработана технология автоматической классификации снимка высокого разрешения для оценки плотности леса и количественного соотношения хвойных и лиственных пород деревьев. Технология состоит в проведении классификации космического снимка, конвертации результатов классификации в векторный формат и последующем построении плотностных сеток (рис. 1). При проведении классификации с обучением правилом максимального правдоподобия на осеннем снимке были выделены площади распространения хвойного леса. Полученный класс конвертировался в векторный слой, показывающий распределение и сомкнутость хвойных деревьев в изучаемых лесах. На летнем снимке лиственные и хвойные виды деревьев располагаются близко в пространстве спектральных признаков и тяжело поддаются распознаванию методами автоматической классификации. Однако этот снимок отражает реальную картину распространения и сомкнутости лиственных деревьев в лесах Академгородка, в то время как характеристики их сомкнутости на позднеосенних снимках получаются сильно заниженными. Вектор, полученный на основе классификации летнего снимка методом максимального правдоподобия, представлен кронами как лиственных, так и хвойных деревьев. Для того чтобы выделить из вектора крон всего леса лиственные и хвойные деревья проводилась оверлейная операция. Для этого векторный слой хвойных пород деревьев, полученный на основе осеннего снимка, наложили на векторный слой всего леса летнего снимка. Объединив пашни, залежи, газоны, дороги и тени в один класс и распределив леса между разными видами деревьев, мы получили три типа объектов: кроны хвойных деревьев, кроны лиственных деревьев и открытые пространства. Для того, чтобы разделить вектор проекции крон всего леса на лиственные и хвойные деревья, проводилась оверлейная операция. Для этого вектор проекции крон хвойных деревьев, полученный на основе осеннего снимка, наложили на вектор всего леса и получили местоположение хвойного леса. Затем были построены серии плотностных схем (с шагом сетки 2,5 м и радиусом окна 50 м), отражающие проекции крон летнего леса, леса по соотношению хвойных и лиственных пород.



Рис. 1. Технологическая схема построения схем густоты и породного соотношения леса

Анализ векторных слоев показал, что большая часть лесов ботанического сада характеризуется средней сомкнутостью, что подтверждается полевыми исследованиями. При анализе породного состава лесов выяснилось, что разные сочетания пород занимают различные площади (таблица 1). Так, например, сомкнутые хвойные и лиственно-хвойные леса на изученной территории отсутствуют. Здесь же отметим, что сомкнутые хвойно-лиственные и лиственные леса в сумме не превосходят 0,9 % площади территории. На территории ботанического сада преобладают лиственные леса средней сомкнутости (68,7 %), на долю хвойно-лиственных лесов средней сомкнутости приходится 9,4 % территории, разреженных лиственных – 9 %.

Таблица 1

Площади распространения различных типов лесных сообществ леса ботанического сада в зависимости от густоты (в процентах от общей площади)

Типы лесных сообществ	Отдельно стоящие деревья (0 – 20 %)	Разреженный лес (20 – 40 %)	Нормальный лес (40 – 70 %)	Густой лес (70 – 100 %)
Хвойный	0,013	0,15	0,42	0
Хвойно-лиственный	0,41	2,5	9,4	0,001
Лиственно-хвойный	0,09	0,6	1,8	0
Лиственный	6,15	9,03	68,7	0,86

Аналогичный подход был использован для картографирования других лесных участков территории Академгородка и его ближайшего окружения.

Моделирование природно-антропогенных территориальных комплексов

Для анализа мозаичных природно-антропогенных экосистем Академгородка и его ближайшего окружения использована комплексная технология геоинформационного моделирования сложных природно-антропогенных систем, которая разработана на основе технологии выделения гетерогенных природно-территориальных комплексов (ПТК) (Зольников И. Д. и др., 2010). При создании базы геоданных были выделены основные природные (леса) и антропогенные (застройка, автомобильные и железные дороги, тропинки и т. п.) составляющие ПТК Академгородка. Антропогенные объекты расклассифицированы по степени воздействия на окружающую среду (База нормативной документации). Природные объекты получены в результате классификации космических снимков высокого разрешения. На следующем этапе строятся плотностные схемы для каждого типа элементарного ПТК. Шаг сетки в каждом конкретном случае определяется пространственным разрешением обрабатываемого космического снимка, а радиус скользящего окна подбирается эмпирически в соответствии с функциональным масштабом карты. Были приняты следующие категории дорог/зданий и их воздействие на окружающую среду (таблицы 2).

Коэффициенты воздействия дорог на окружающую среду

Объект \ Категории воздействия	1	2	3	4
Дороги федерального значения				250 м
Дороги с интенсивностью более 2000 ед/сутки, железная дорога			120 м	
Дороги с интенсивностью менее 2000 ед/сутки		50 м		
Тропинки, велосипедные дорожки	10 м			
Здания с этажностью от 1 до 3	10 м			
Здания с этажностью от 4 до 8		50 м		
Здания с этажностью от 9 до 16			120 м	

Для отображения схем рабочего масштаба 1:25000 целесообразно строить плотностные сетки с радиусом 100 м. Для создания более генерализованных схем можно использовать радиус 250 метров. Шаг сетки везде равен пространственному разрешению снимка QuickBird и составляет 2,4 м. Полученный полигональный векторный слой был конвертирован в точечный, по которому были построены 2 плотностные схемы с коэффициентами категории влияния (от 1 до 4) и с коэффициентами зоны воздействия (от 10 до 250).

После сравнения плотностных сеток было решено использовать сетку техногенной нагрузки с коэффициентом зоны воздействия (от 10 до 250 м). Затем она была нормирована на значение, равное 100 % заполнению скользящего окна объектами с коэффициентом воздействия 100 м. В физическом смысле такое плотностное значение соответствует территории, которая полностью занята дорогами и зданиями третьей категории. Также была построена сетка по вектору растительности с радиусом 100 м и нормирована на максимальное значение, т. е. на значение, соответствующее 100 % заполнению скользящего окна лесной растительностью. Полученные сетки были классифицированы методом Natural Brakes (Jenks), в результате чего в их пределах были выделены статистические обусловленные зоны, контрастные по типовым значениям. Метод Natural Brakes был выбран потому, что в нем границы классов определяются в тех местах гистограммы, где имеется резкий перепад между группами значений. При этом образуются интервалы, которые лучше всего группируют близкие значения и максимизируются различия между классами. Древесная растительность и техногенная нагрузка были разделены на 4 группы. По степени техногенного воздействия выделены группы с отсутствием техногенной нагрузки, со слабой нагрузкой, со средней нагрузкой и с сильной техногенной нагрузкой. Древесная растительность была разделена на отдельно стоящие деревья, разреженный лес, нормальный лес и густой лес. На следующем шаге полученные сетки конвертировались в вектор и проводились оверлейные операции по совмещению техногенной застройки и древесной растительности. Поскольку класс с редкой растительностью и средней техногенной нагрузкой небольшой по площади то он был объединен с классом с редкой растительностью и слабой техногенной нагрузкой. Так же классы с густым лесом и сильной и средней техногенной нагрузкой были объединены соответственно с классами с нормальным лесом и средней и сильной техногенной нагрузкой. На рисунке 2 представлена интегральная схема растительности и застройки, а в таблице 3 приведены процентное содержание различных комбинаций.

Созданная база данных и ГИС-атлас Новосибирского Академгородка является основой для дальнейшего мониторинга и моделирования природно-антропогенных экосистем территории. Это позволяет получить доступ через Интернет к различным тематическим данным специалистам различного профиля. Предлагаемая комплексная технология моделирования гетерогенных ландшафтов позволяет не только картографировать их, но и количественно оценивать степень влияния антропогенных систем на природную среду. Кроме того, созданная база позволяет проводить ретроспективное и прогнозное моделирование природно-антропогенной системы, а также является основой для дальнейшего мониторинга и планирования развития территории.

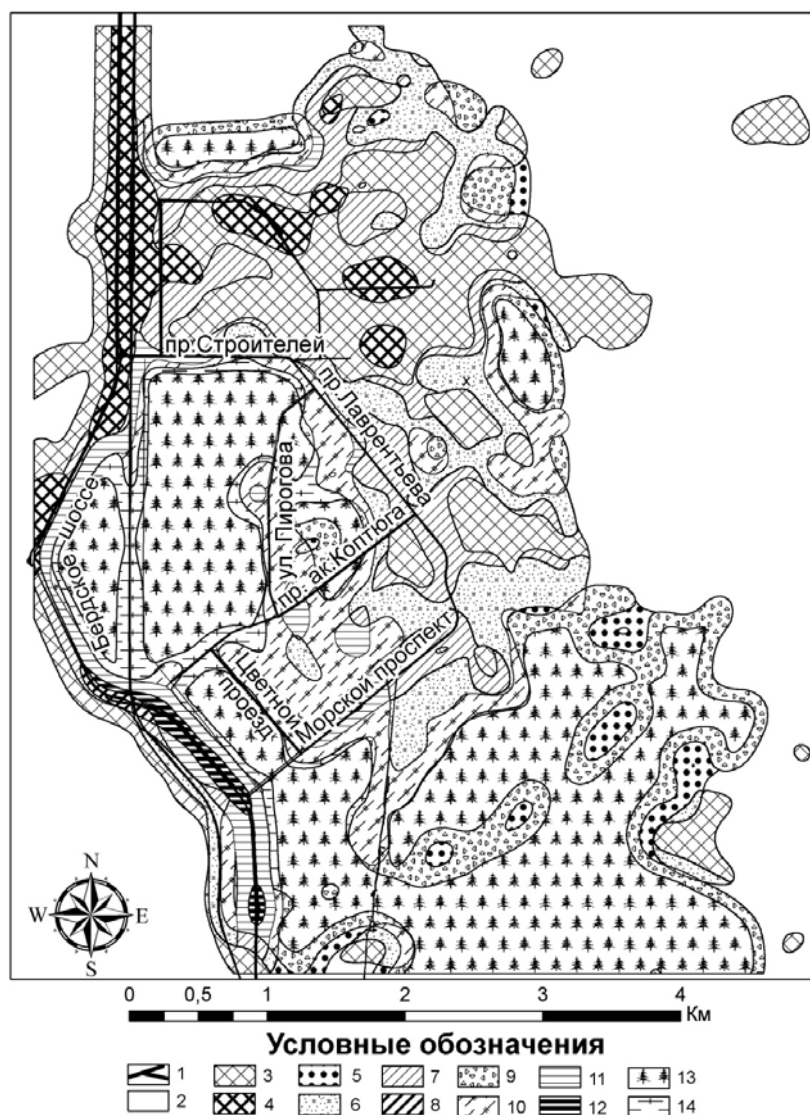


Рис. 2. Интегральная схема древесной растительности и техногенной застройки

Условные обозначения: 1 – дороги, 2 – пустыри, 3 – участки со средним техногенным воздействием и отдельными деревьями, 4 – Участки с сильным техногенным воздействием и отдельными деревьями, 5 – разреженный лес без техногенного воздействия, 6 – разреженный лес со слабым техногенным воздействием, 7 – разреженный лес со средним техногенным воздействием, 8 – разреженный лес с сильным техногенным воздействием, 9 – нормальный лес без техногенного воздействия, 10 – нормальный лес со слабым техногенным воздействием, 11 – нормальный лес со средним техногенным воздействием, 12 – нормальный лес с сильным техногенным воздействием, 13 – густой лес без техногенного воздействия, 14 – густой лес со слабым техногенным воздействием.

Таблица 3

Природно-территориальные комплексы, выделенные в зависимости от соотношения площади распространения различных типов техногенной застройки и древесной растительности (в процентах) для сетки радиусом 250 м

	Отдельно стоящие деревья	Редкий лес	Нормальный лес	Густой лес
Нет техногенного воздействия	0,15	2,15	7,8	29,7
Слабое техногенное воздействие	17,3	9,85	10,1	3,85
Среднее техногенное воздействие	0	8,5	4	0
Сильное техногенное воздействие	5,6	0,3	0,7	0

Литература

1. База нормативной документации: Руководство по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) при проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации объектов дорожного хозяйства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.complexdoc.ru.
2. Владимиров, В. В. Урбозоология Курс лекций / В. В. Аладимиров. – М.: МНЭПУ, 1999. – 204 с.
3. Картографирование лесных массивов Центрального сибирского ботанического сада / Н. В. Глушкова, И. Д. Зольникова, В. А. Лямина [и др.] // Вестник НГУ. – 2010. – Т. 8. – № 3.
4. Зольников, И. Д. Комплексная технология картографирования и мониторинга гетерогенных ландшафтов / И. Д. Зольников, В. А. Лямина, А. Ю. Королук // География и природные ресурсы. – 2010. – № 2.
5. Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации // Геодезия и картография. – М., 2006. – № 10.
6. Природа Академгородка: 50 лет спустя / отв. ред. И. Ф. Жимулев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2007. – 250 с.

Информация об авторах:

Добрецов Николай Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Института геологии и минералогии СО РАН, т. 8(383) 335-62-79, dnn@igm.nsc.ru.

Dobretsov Nikolay Nikolaevich – Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory at the Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

Зольников Иван Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Российской академии наук Института геологии и минералогии СО РАН, т. 8(383) 335-62-79, zol@igm.nsc.ru.

Zolnikov Ivan Dmitrievich – Candidate of Geology and Mineralogy, senior researcher at the Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

Глушкова Надежда Владимировна – кандидат технических наук, научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН, т. 8(383) 335-62-79, hope@igm.nsc.ru.

Glushkova Nadezhda Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, researcher at the Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

Лямина Виктория Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Российской академии наук Института геологии и минералогии СО РАН, т. 8(383)335-62-79, balandis@igm.nsc.ru.

Lyamina Viktoriya Alexandrovna – Candidate of Geology and Mineralogy, resaearcher at the Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

Соколов Константин Сергеевич – научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН, т. 8(383) 335-62-79, sokolov@dataeast.ru.

Sokolov Konstantin Sergeevich – researcher at Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

Макунина Наталья Ивановна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН, т. 8 (383) 335-62-79, natali.makunina@mail.ru.

Makunina Natalia Ivanovna – Candidate of Biology, senior researcher at the Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the RAS.

Смирнов Валентин Валентинович – инженер-исследователь Института вычислительных технологий СО РАН, т. 8(383) 335-62-79, valentin@ict.nsc.ru.

Smirnov Valentin Valentinovich – research engineer at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Пчельников Денис Владимирович – ведущий инженер Института геологии и минералогии СО РАН, т. 8(383) 335-62-79, denmail@ngs.ru.

Pchelnikov Denis Vladimirovich – leading engineer at the Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДЗЕМНОГО ГАЗИФИКАТОРА ПО МЕТОДУ ПОТОКА

Ю. Н. Захаров, Е. Е. Зеленский, М. С. Родина

MATHEMATICAL MODELLING OF AN UNDERGROUND GASIFIER WORK WITH THE FLOW METHOD

Y. N. Zakharov, E. E. Zelenskiy, M. S. Rodina

Подземная газификация угля (ПГУ) – физико-химический процесс превращения угля в горючие газы с помощью свободного или связанного кислорода непосредственно в недрах земли. В настоящей работе представлена математическая модель работы подземного газификатора. Приводятся численные результаты расчётов изменения состава газа внутри газификатора.

Underground gasification of coal is a physical and chemical process of transformation of coal into combustible gases by means of the free or connected oxygen directly in earth interiors. In the present paper the mathematical model of an underground gasifier work is provided. Numerical results of calculations of gas composition changes in an underground gasifier are given.

Ключевые слова: Газификация угля, течение сжимаемой жидкости, гидродинамика, уголь.

Keywords: coal gasification, current of a compressible liquid, hydrodynamics, coal.

Технологический процесс подземной газификации угля (ПГУ) выглядит следующим образом: в угольный пласт с поверхности бурятся две наклонно-вертикальные скважины, которые потом соединяются горизонтальным каналом (т. н. «огневой штрёк»). Затем производится розжиг огневого штрёка, после чего горение распространяется по всей угольной поверхности штрёка, который называется огневым забоем. Одновременно с этим производится подача воздушного или парокислородного дутья в одну скважину (дутьевая скважина) и отвод образующегося при горении угля газа из другой (газосборочная скважина). Угольный пласт постепенно выгорает снизу вверх, и огневой забой перемещается по направлению выгорания – вверх, а выгоревшее пространство заполняется обрушивающимися обломками кровли и зольными остатками угля. При этом за счёт выгорания угля объём огневого штрёка практически не изменяется. Выделяющийся в ходе реакций разложения и последующего окисления углерода кокса на огневом забое газы делятся на две части. Одна часть за счёт градиента давления фильтруется в область массива угля, а другая поступает в огневой штрёк, где за счёт конвекции и диффузии нагревает газовую смесь, инициируя в ней гомогенные реакции окисления (более подробно см. [1]).

В данной работе будет рассмотрен метод решения модели, описывающий течение и изменение состава неоднородного газа внутри огневого штрёка на начальной стадии работы подземного газификатора.

1. В работах [2, 3] приведена двухмерная модель ПГУ, которая описывает процессы, происходящие при ПГУ как в массиве угля, так и огневом штрёке.

В этом пункте мы приведём уравнения, описывающие процессы ПГУ только в огневом штрёке. На рис. 1 приведена двухмерная схема ПГУ. Далее мы будем считать, что граница Γ_1 («огневой забой») является неподвижной. Таким образом, изменение формы огневого штрёка Ω_2 не происходит. Помимо этого на границе Γ_1 задаётся состав газа, образующегося при горении угля.

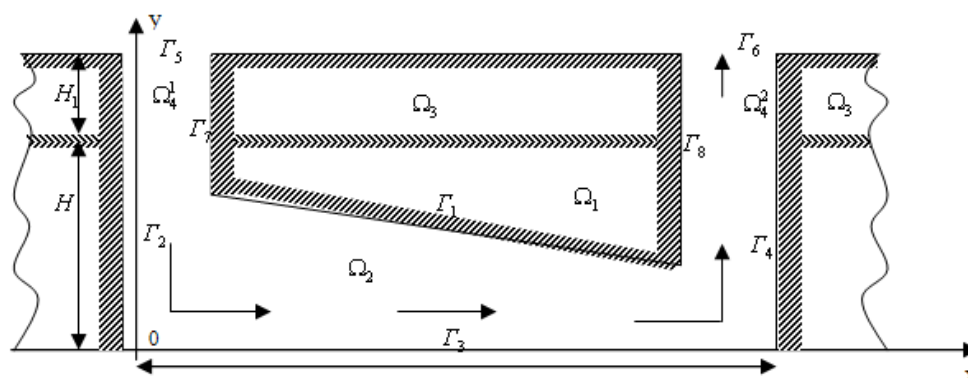


Рис. 1. Схема ПГ по методу потока

Здесь Ω_1 – угольный пласт, Ω_2 – огневой штрек, Ω_3 – порода над угольным пластом, Ω_4^1 и Ω_4^2 – дутьевая и газосборочная скважины. H – толщина (высота) угольного пласта, H_1 – глубина залегания угля, Γ_1 – огневой забой, Γ_2 и Γ_7 – стенки дутьевой скважины, Γ_4 и Γ_8 – стенки газосборочной скважины, Γ_3 – нижняя граница штрека, Γ_5 и Γ_6 – входное и выходное сечения скважин.

Вначале приведём основные обозначения, используемые при дальнейшем изложении:

$\rho(x, y, t)$ и $P(x, y, t)$ – плотность и давление газовой смеси, $T(x, y, t)$ – температура, $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции вектора скорости на оси X и Y соответственно, R – универсальная газовая постоянная, $\sum_{i=3}^6 q_i \cdot p_i$ – тепловые эффекты химических реакций, D_k – эффективный коэффициент диффузии k -го газа, C_k – доля k -го газа в газовой фазе, где $k = 1 - CH_4$, $k = 2 - H_2$, $k = 3 - CO$, $k = 4 - O_2$, $k = 5 - CO_2$, $k = 6 - H_2O$, $k = 7 - N_2$, μ , λ и Cp – вязкость, теплопроводность и удельная теплоёмкость смеси газов:

$$\left(\mu = \sum_{k=1}^7 \mu_k C_k, \lambda = \sum_{k=1}^7 \lambda_k C_k, Cp = \sum_{k=1}^7 Cp_k C_k \right).$$

Процесс ПГУ в огневом штреке (область Ω_2) при неподвижном огневом забое (Γ_1) описывается следующими уравнениями, для которых поставлены соответствующие начально-краевые задачи:

1) уравнение неразрывности газовой смеси:

$$\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho(x, y, t)U(x, y, t)) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho(x, y, t)V(x, y, t)) = 0; \quad (1)$$

$$\rho|_{\Gamma_1} = \rho_1(x, y, t), \rho|_{\Gamma_5} = \rho_5(x, y, t), \frac{\partial \rho|_{\Gamma_6}}{\partial y} = \beta|\rho_5 - \rho_{амм}|, \frac{\partial \rho|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_7, \Gamma_8}}{\partial n} = 0;$$

2) уравнение сохранения энергии:

$$\rho(x, y, t) \cdot Cp \cdot \left(\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) + \sum_{i=3}^6 q_i \cdot p_i;$$

$$T|_{\Gamma_1} = T_1(x, y, t), \quad T|_{\Gamma_5} = T_5(x, y, t),$$

$$\frac{\partial T|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8}}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

3) уравнения движения Навье-Стокса:

$$\rho(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\rho(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial V(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \right);$$

$$\begin{aligned}
V|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_7, \Gamma_8} &= U|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8} = 0, \\
V|_{\Gamma_1} &= V_1(x, y, t), \\
V|_{\Gamma_5} &= V_5(x, y, t), \\
V|_{\Gamma_6} &= V_6(x, y, t);
\end{aligned}$$

4) уравнение диффузии компонент

$$\rho(x, y, t) \left(\frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho(x, y, t) \cdot D_k \cdot \frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho(x, y, t) \cdot D_k \cdot \frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial y} \right) + W_k, \right. \quad (4)$$

$$k = 1, \dots, 6, \quad \sum_{k=1}^7 C_k = 1;$$

$$\begin{aligned}
C_k|_{\Gamma_1} &= C_{k1}(x, y, t), \quad C_k|_{\Gamma_5} = C_{k5}(x, y, t), \\
\frac{\partial C_k}{\partial n}|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8} &= 0; \\
P(x, y, t) &= \frac{\rho(x, y, t) \cdot R \cdot T(x, y, t)}{\mu}.
\end{aligned}$$

Здесь $\rho(x, y, t)$, $T(x, y, t)$ – рассчитанные ранее функции.

2. Далее будем считать, что процесс газификации находится в начальной стадии и огневой забой Γ_1 параллелен оси OX . В области Ω_2 введём прямоугольную равномерную сетку с шагами h_x , h_y по осям OX , OY и по времени с шагом τ . Для проведения численных расчётов задач (1) – (4) мы использовали следующие разностные схемы. Для уравнения неразрывности газовой смеси (1) использовалась схема Лакса-Вендроффа [4], для уравнения сохранения энергии (2) – схема стабилизирующей поправки [5]. Уравнения движения Навье-Стокса (3) и уравнения диффузии компонент (4) решаются схемой переменных направлений [5]. В силу ограничения объёма статьи мы не приводим подробное описание используемых разностных схем.

Результаты проведённых расчётов показаны на рисунках 2 – 6. Значения коэффициентов μ_k , λ_k , Cp_k для i -го газа приведены в работах [6] – [8], а термокинетических постоянных q_{3-6} , k_{3-6} , E_{3-6} , M_{3-6} , M_y , M_c приведены в работах [9] – [11].

На рисунках 2 – 5 приведена динамика изменения параметров течения для следующих моментов времени t :

$$\begin{aligned}
t_1 &= 0,001; \\
t_2 &= 0,01; \\
t_3 &= 0,05; \\
t_4 &= 0,2; \\
t_5 &= 0,5.
\end{aligned}$$

5) уравнение состояния газовой фазы

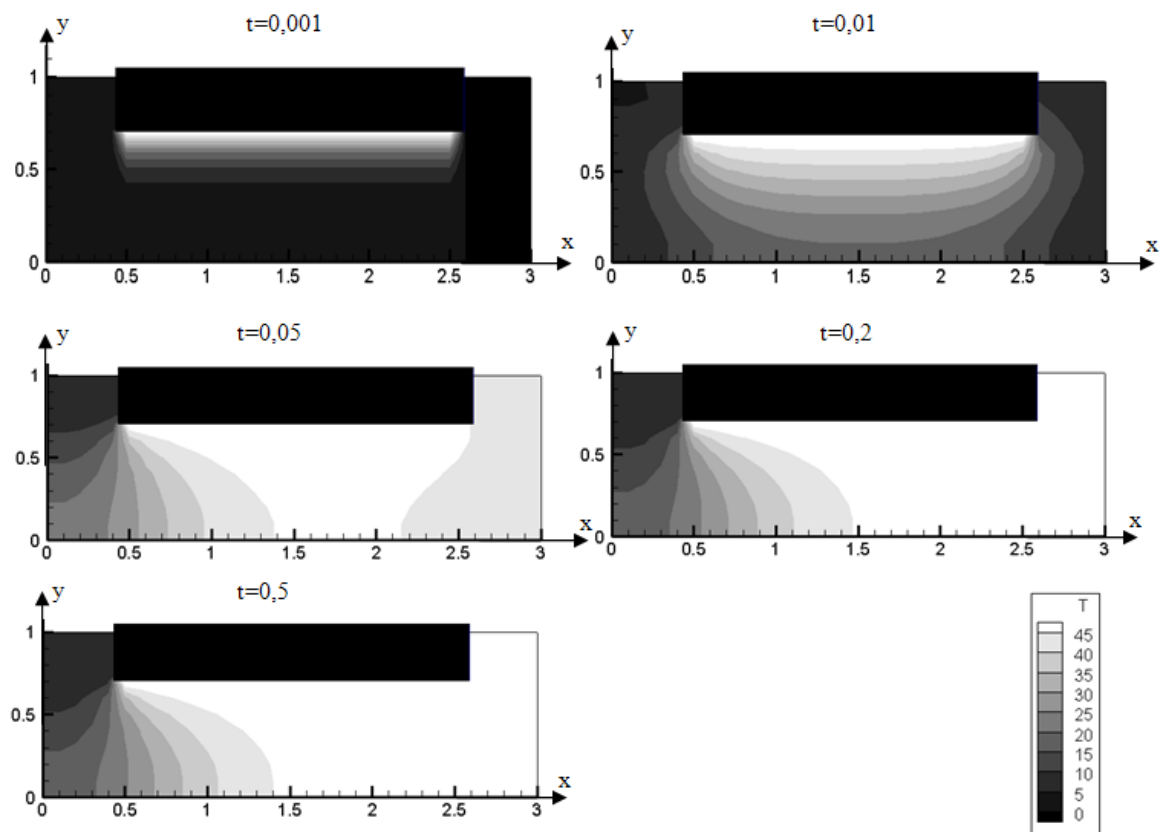


Рис. 2. Изменение поля температур $T(x, y, t)$ при постоянном равномерном выделении продуктов горения угля по границе Γ_1 (огневой забой)

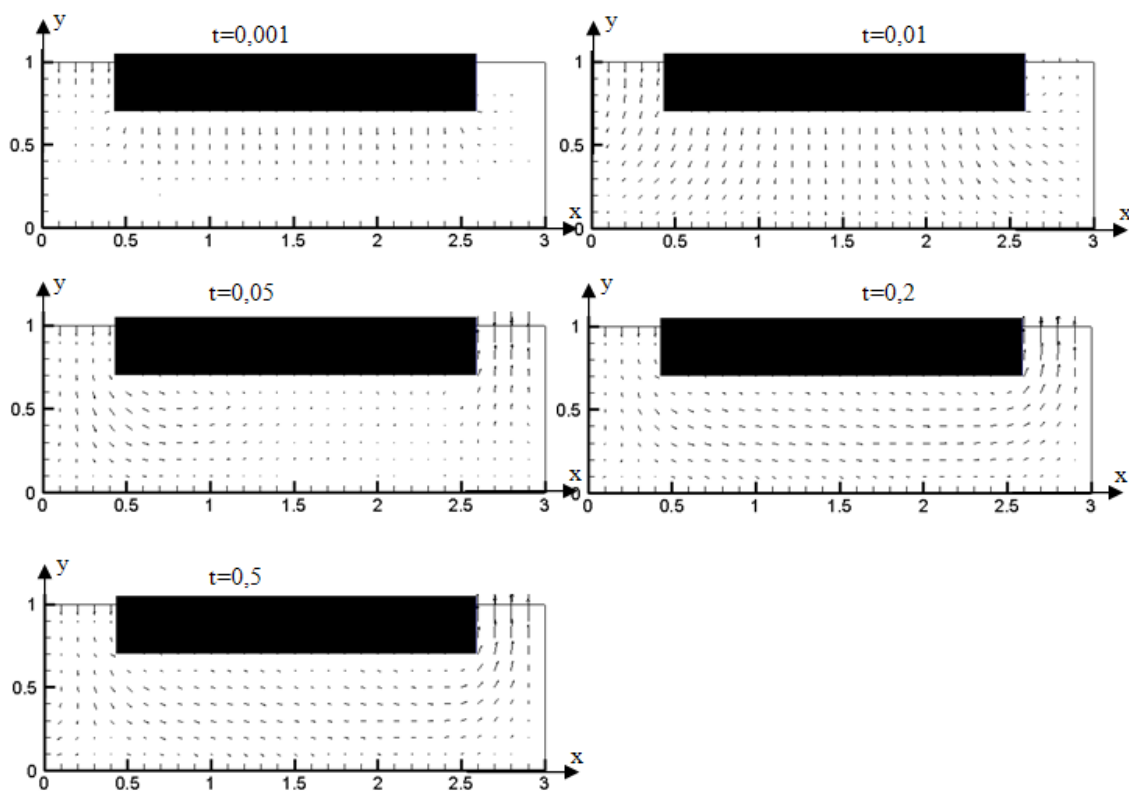


Рис. 3 Изменение поля скоростей $U_x(x, y, t), V_x(x, y, t)$

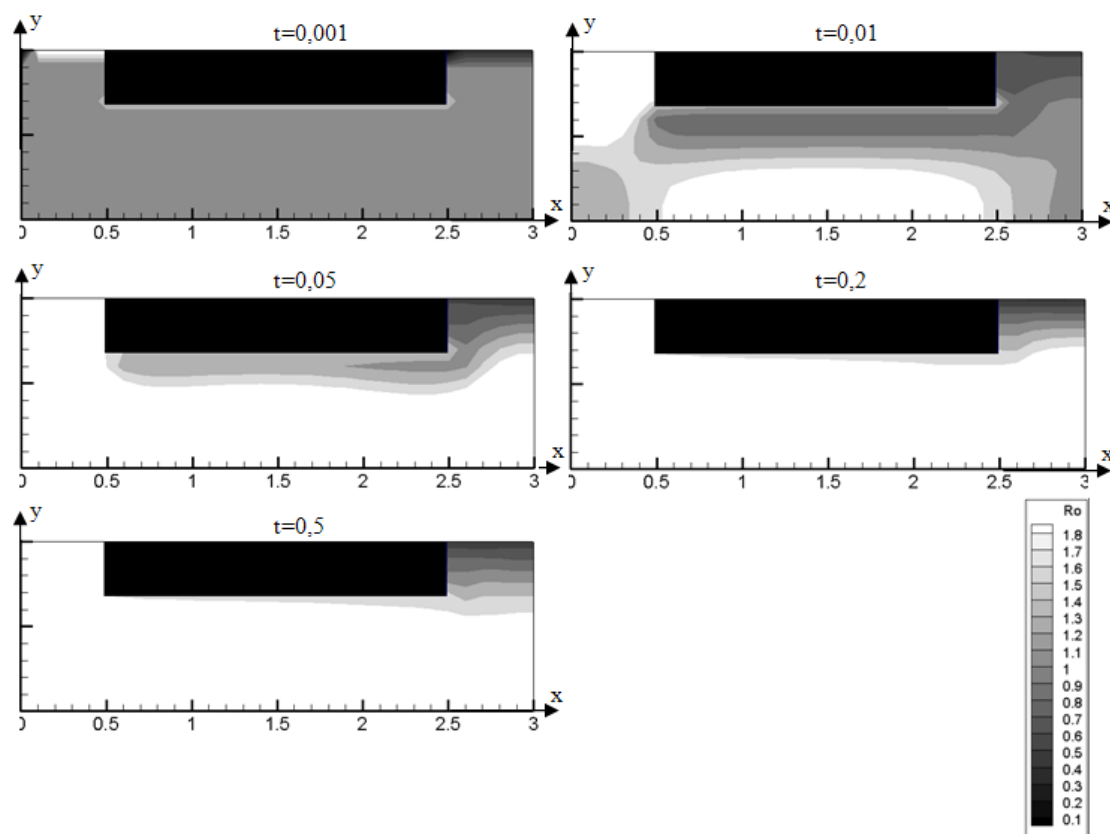


Рис. 4. Изменение поля плотности $\rho(x, y, t)$ газовой смеси

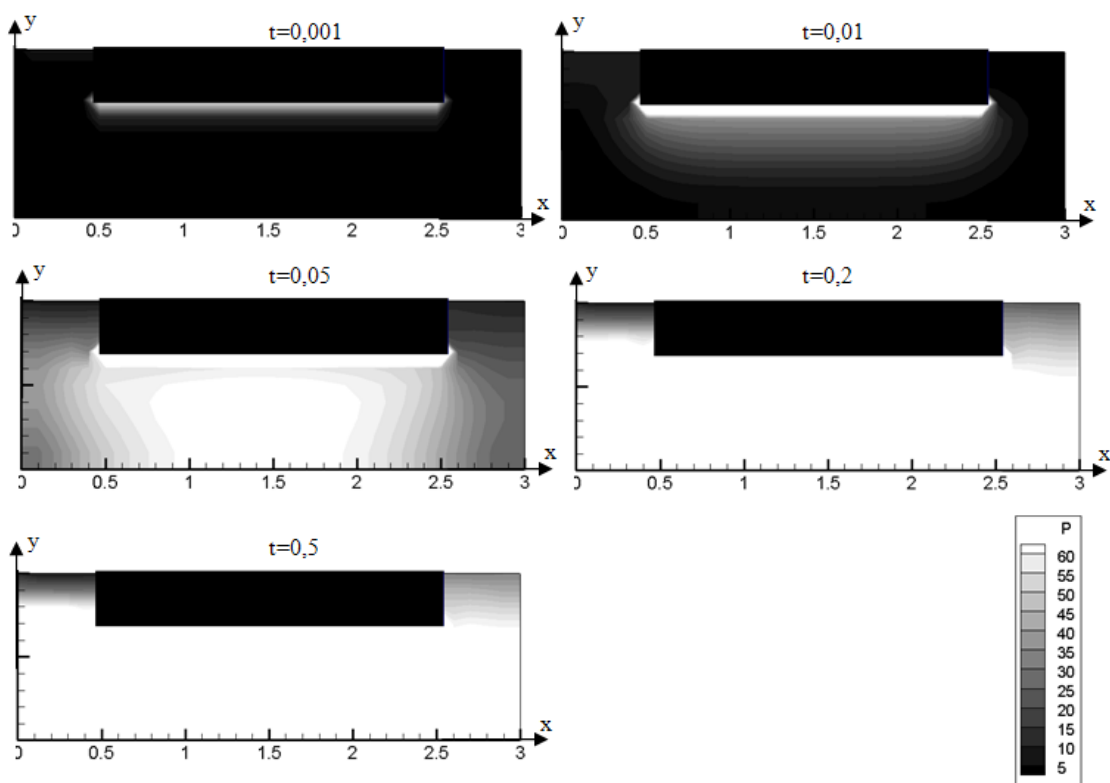


Рис. 5. Изменение давления $P(x, y, t)$ газовой смеси

В качестве начальных данных были взяты следующие долевые соотношения газового состава в огневом штреке (см. таблицу 1):

Таблица 1

	Начальный состав газа в ПГУ (%)	Состав дутья (%)	Состав газа, образующийся при горении каменного угля (%)
CH_4	0	0	2
H_2	0	0	11
CO	0	0	10
O_2	20	21	0
CO_2	0,5	0,05	11,5
N_2	78,5	78	65,5

На рис. 6 приведены графики изменения состава газа на границе газосборочной скважины Γ_6 .

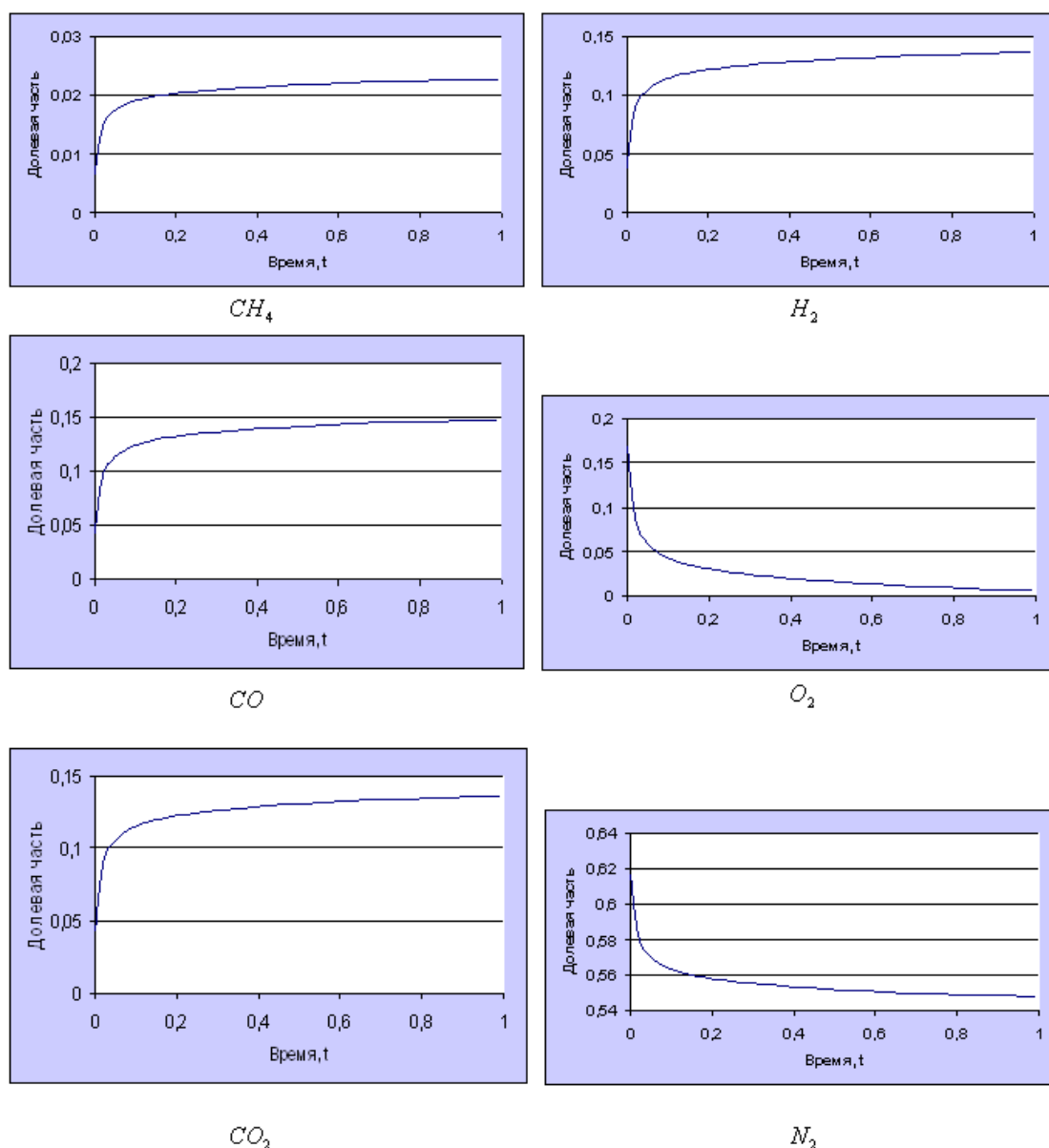


Рис. 6. Изменение компонентов состава газа на границе газосборочной скважины (Γ_6)

Далее во второй колонке таблицы 2 приведён установившийся состав газа на границе газосборочной скважины (Γ_6), полученный при решении задачи (1) – (4). В следующих двух колонках – расчетный и реальный состав газа, представленный в [1].

Таблица 2

	Расчетный ито- говый состав газа (%)	Состав газа по Крейнину (каменный уголь, процент кислорода в дутье = 21 %)	Реальный состав газа по Крейни- ну (каменный уголь, процент ки- слорода в дутье = 21 %)
CH_4	2,3	2,1	2,6
H_2	12,5	13,1	12,5
CO	12,1	22,2	11,9
O_2	0,4	0	0,2
CO_2	13,4	6,6	13,2
N_2	59	56	59,5
Неучитываемая примесь	0,3	-	0,1

Расхождение расчётного состава газа и реального газа при ПГУ на базе шахты Южно-Абинской имеют место только по кислороду (O_2), что связано с различием состава газа выделяемого при горении реального угля и использованного в расчётах.

Проведённые расчёты позволяют сделать вывод, что предложенная в работе модель работы подземного газификатора качественно правильно отражает реальный процесс ПГУ, проведённый на шахте Южно-Абинской в Кузбассе (см. [1]).

Литература

1. Крейнин, Е. В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырьё / Е. В. Крейнин. – М.: НРЦ Газпром, 2004. – 301 с.
2. Численное решение двумерной задачи о подземной газификации угля [Электронный ресурс] / Ю. Н. Захаров, П. В. Дементьев, Е. Е. Зеленский, М. В. Родина // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика: Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н. Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г., Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2011, № гос. регистрации – 0321101160. – Режим доступа: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/38540/47069/zaxarovyn.pdf> (дата обращения: 06.11.2011).
3. About one model of in-situ coal gasification/ Y. N. Zakharov, M. Y. Zakharov, E. E. Zelensky, V. P. Potapov, E. L. Schaslivtcev // Proceedings of International Conference “Mathematical and Informational Technologies MIT-2009” (Kopaonik, Serbia, Budva, Montenegro, 27 August-5 September 2009). – Kosovska Mitrovica, 2009. – P. 447 – 452.
4. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
5. Яненко, Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н. Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 197 с.
6. Таблицы физических величин: справочник / под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
7. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения о веществах. Физические свойства важнейших веществ. Техника лабораторных работ. Интеллектуальная собственность. – СПб: Мир и Семья, 2006 – 1464 с.
8. Инженерный справочник: 2006-2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dpva.info>. (дата обращения: 10.01.2012).
9. Алексеев, Б. В. Физическая газодинамика реагирующих сред: учеб. пособие для мех.-мат. и физ. спец. вузов / Б. В. Алексеев, А. М. Гришин. – М.: Высшая школа, 1985. – 464 с.
10. Гришин, А. М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А. М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 239 с.
11. Померанцев, В. В. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов; под ред. В. В. Померанцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 312 с.

Информация об авторах:

Захаров Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики КемГУ, зав. кафедрой вычислительной математики КемГУ, т. 8(384-2) 54-27-70, zyn@kemsu.ru.

Zakharov Yuriy Nikolaevich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Computational Mathematics of KemSU, Head of the Department of Computational Mathematics of KemSU.

Зеленский Евгений Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики КемГУ, т. 8(384-2) 54-27-70, zyn@kemsu.ru.

Zelenskiy Evgeniy Evgenievich – Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Computational Mathematics of KemSU.

Родина Мария Сергеевна – аспирант, консультант Государственной службы по надзору и контролю в сфере образования Кемеровской области, т. 8(902)755-57-78, nika_romansu@rambler.ru

Rodina Maria Sergeevna – post-graduate student, adviser at the State service for supervision and control in education of Kemerovo region.

УДК 681.5.015:65.011.56

КОМБИНИРОВАННОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ – ОСНОВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАЗРАБОТКИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. А. Ивушкин, М. В. Шипунов, В. В. Грачев, Л. П. Мышляев

COMBINED SIMULATION AS THE BASIS FOR SOLVING THE TASKS OF AUTOMATED COMPLEXES DEVELOPMENT

A. A. Ivushkin, M. V. Shipunov, V. V. Grachev, L. P. Myshlyaev

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 10-07-00193-а.

В статье приводятся постановки, методы и результаты решения задач выработки план-графиков создания автоматизированных комплексов и натурно-модельного исследования эффективности стимулирующих функций. Показано, что использование квадратичной и кусочно-линейной функций стимулирования позволяет уменьшить сроки и затраты проектирования на 10 %.

The article presents the formulation, methods and results of solving the tasks of schedules production for automated systems creation and field-modeling studies of the enabling functions effectiveness. It is shown that the use of quadratic and piece linear incentive functions helps reduce design time and costs by 10 %.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс, план-график, стимулирующая функция, натурно-модельное исследование.

Keywords: automated complex, schedule, incentive function, full-scale-model study.

Существенное, в три-четыре раза, сокращение сроков создания крупных автоматизированных комплексов, повышение требований к их технико-экономическим показателям, увеличивающаяся сложность систем автоматизации и необходимость их включения в работу с момента начала пуско-наладки технологического оборудования побудило к поиску новых подходов к планированию, разработке и внедрению этих комплексов [5, с. 273 – 276].

Используемые в настоящее время методы и нормы, созданные в 80 – 90-х годах прошлого века, оказались малоэффективными в новых социально-экономических условиях. Это объясняется, главным образом, тем, что в этих документах не учитываются современные технологии и методы, постоянно и быстро обогащаемый опыт строительства, а также отсутствует должное внимание к вопросам стимулирования [2].

Необходимо развитие и дополнение традиционных методов решения задач разработки автоматизированных комплексов с использованием комбинированного имитационного моделирования [3, 7], представлений теории активных систем [8], поисковых оптимизационных процедур [1, 4, 6], планирования эксперимента. Имитационное натурно-математического моделирование позволяет, основываясь на информации об уже созданных комплексах, более полно выявлять неиспользованные резервы, адекватно учитывать реальные ситуации и, как правило, получать лучшие результаты.

Исходя из этого, актуальна проблема развития методов и алгоритмов ускорения создания автоматизированных комплексов. В рамках этой общей цели можно выделить наиболее важные задачи:

- разработка методов и алгоритмов выработки план-графиков создания автоматизированных комплексов,
- исследование влияния законов стимулирования на сроки и эффективность выполнения проектов.

Постановки решения этих задач сделаны в следующем виде.

1. Постановка задачи выработки план-графиков создания автоматизированных комплексов

Дано. 1. Фактически реализованные траектории $Y(t)$ освоения средств для проектирования и строительства промышленного комплекса на интервале $t \in [T_H, T_K]$, где T_H, T_K – время начала и окончания проектирования, строительства и освоения автоматизированного комплекса до вывода его на проектные показатели.

2. Вектор $\hat{W}$ предстоящих условий проектирования и строительства и возможные диапазоны стимулирования $\{S \left\{ \hat{S}^{\min}, \hat{S}^{\max} \right\}\}$.

3. Пересчетные зависимости влияния изменений внешних условий $\Delta W = W - \hat{W}$ и стимулов $\Delta S = S - \hat{S}$ на изменения длительности выполнения отдельных видов работ.

4. Алгоритмы деформации и экстраполяции $F^3[\cdot]$ динамики многомерных нестационарных временных последовательностей Z

$$Z^3(t + \theta) = F^3[Z(t - \ell)], \quad (1)$$

где θ и ℓ – величины интервалов экстраполяции и памяти.

5. Критерий оптимизации $Q(T_H, T_K)$, характеризующий затраты на проектирование, строительство и доход от реализации продукции.

Требуется. Построить оптимальный план освоения ресурсов, проектирования и строительства промышленного комплекса, а также отдельных видов работ.

Для решения этой задачи разработан метод, сущность которого состоит в формировании эталонных траекторий по результатам уже выполненных проектов, их приведении к базовым условиям с экстраполяцией базовых траекторий, пересчете экстраполированных базовых эталонных траекторий на условия предстоящего проекта.

Реализация метода заключается в выполнении следующих операций.

Во-первых, осуществляется построение эталонных траекторий, в частности, на основе экспертных оценок и пересчетного математического моделирования.

Затем, выявляются условия проектирования и строительства, которые наиболее значимо влияют на нормативы, и для каждого конкретного промышленного комплекса определяются их численные значения. К наиболее значимым отнесены условия: проектная мощность объекта, технические и технологические решения, географические и климатические условия, наличие строительно-монтажных организаций в регионе.

Во-вторых, осуществляется расчетное приведение эталонных траекторий к базовым условиям – получение базовых эталонных траекторий; эталонная траектория подвергается масштабирующим деформациям, и в результате эталонные нормативы принимают конкретные значения для проекта, принятого за базовый.

В-третьих, базовые эталонные траектории экстраполируются на предстоящий период.

И, наконец, в-четвертых, экстраполированные траектории пересчитываются на условия предстоящего проекта путем корректировки по отклонениям условий предстоящего проекта от базового.

Точность решения во многом определяется адекватностью используемых моделей. В общем случае модель можно представить в виде

$$T^H = F[\hat{W}, W^B, T^B], \quad (2)$$

где T^H, T^B – нормативы соответственно предстоящего и базового проекта; $F[\cdot]$ – динамический оператор преобразования вектора условий предстоящего проекта $\hat{W}$, базового проекта W^B и базового норматива T^B .

При практическом применении наиболее приемлема структура так называемой пересчетной модели, которая в одном из вариантов имеет вид

$$T^H = T^B + f[\hat{W} - W^B], \quad (3)$$

где $f[\cdot]$ – оператор пересчета вариаций $\hat{W}$ от базового уровня W^B .

В частном случае оператор $f[\cdot]$ может быть представлен в виде линейной модели, в простейшем случае – пересчетным коэффициентом

$$T^H = T^B + \sum_{i=1}^n k_i \cdot (\hat{W}_i - W_i^B), \quad (4)$$

где k_i – коэффициент пересчета отклонения i -го условия проекта ΔW_i в изменение норматива ΔT_i , n – количество условий создания проекта.

Конкретизация данного метода сделана на примере траекторий освоения финансовых средств при проектировании и строительстве углеобогащительных фабрик. За исходные данные взяты фактические траектории освоения средств при проектировании и строительстве четырех обогащительных фабрик (ОФ), условно ОФ I, ОФ II, ОФ III, ОФ IV (рис. 1).

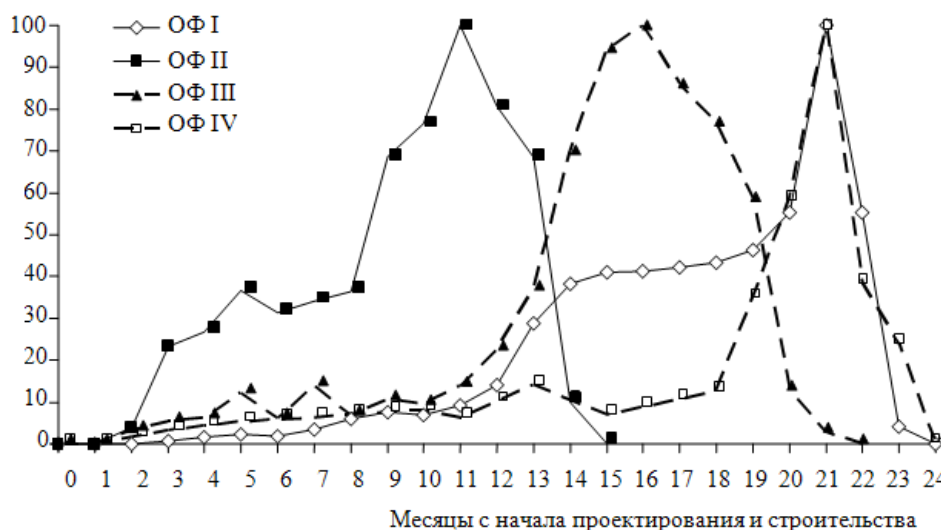
Освоение средств
в процентах от максимума, %

Рис. 1. Траектории фактического освоения средств при проектировании и строительстве ОФ

При формировании эталонной траектории учитывали равномерность финансирования, наличие кадрового обеспечения организаций исполнителей, форс-мажорные обстоятельства. Таким образом, из множества фактических траекторий выбрана та, которая была наименьшим образом подвергнута искажениям из-за организационных изменений во время проектирования и строительства – траектория ОФ II. В дальнейшем она была “очищена” от различного рода выбросов, нормирована на диапазон $0 \div 1$ и принята за эталонную траекторию. “Очищенная” траектория ОФ II послужила одновременно и базовой траекторией, так как именно условия ОФ II приняты за базовые.

Траектории фактического освоения средств (рис. 1) имеют качественно одинаковую структуру, и количественно они зависят в основном от следующих факторов:

- проектная мощность ОФ;
- уровень сложности технологического процесса (количество технологических стадий и агрегатов);
- геологические и климатические условия места строительства;
- степень развитости инфраструктуры в регионе;
- функция стимулирования исполнителей.

Для этих факторов был проведен пересчет базовой эталонной траектории на условия предстоящего проекта – планируемой к строительству ОФ V. Структура пересчетной модели взята в виде (4), а численные значения коэффициентов модели представлены в таблице 1.

Таблица 1

Пересчетные коэффициенты модели (4)

Пересчетный коэффициент	Обозначение	Значение
1. Коэффициент пересчета отклонения по проектной мощности ОФ, мес. / млн. тонн в год по рядовому углю	k_1	5,0
2. Коэффициент пересчета отклонения по уровню сложности технологического процесса, мес. / балл	k_2	1,8
3. Коэффициент пересчета отклонения по геологическим и климатическим условиям места строительства, мес. / балл	k_3	1,5
4. Коэффициент пересчета отклонения по степени развитости инфраструктуры в регионе, мес. / балл	k_4	-2,0
5. Коэффициент пересчета изменений стимулирования на изменение длительности проекта для квадратичной функции, % от базового норматива	k_5	-10

Условия проектирования и строительства всех ОФ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Условия проектирования и строительства ОФ

Условие проектирования и строительства ОФ	Обозначение	Диапазон изменения	Введенные в эксплуатацию ОФ				Планируемая ОФ
			I	II (базовая ОФ)	III	IV	V
1. Проектная мощность ОФ, млн. тонн в год по рядовому углю	W_1	0-15	3	2,5	2,4	1,5	3,0
2. Уровень сложности технологического процесса, в баллах	W_2	1-10	5	4	5	3	5
3. Геологические и климатические условия места строительства, в баллах	W_3	1-5	3	4	4	5	5
4. Степень развитости инфраструктуры в регионе, в баллах	W_4	1-5	3	4	5	4	5
5. Функция стимулирования исполнителей	W_5	Набор функций стимулирования	C- тип	C- тип	C- тип	C- тип	Квадратичная

В результате получена расчетная траектория освоения финансовых средств предстоящего проекта – ОФ V, которая представлена на рисунке 2.

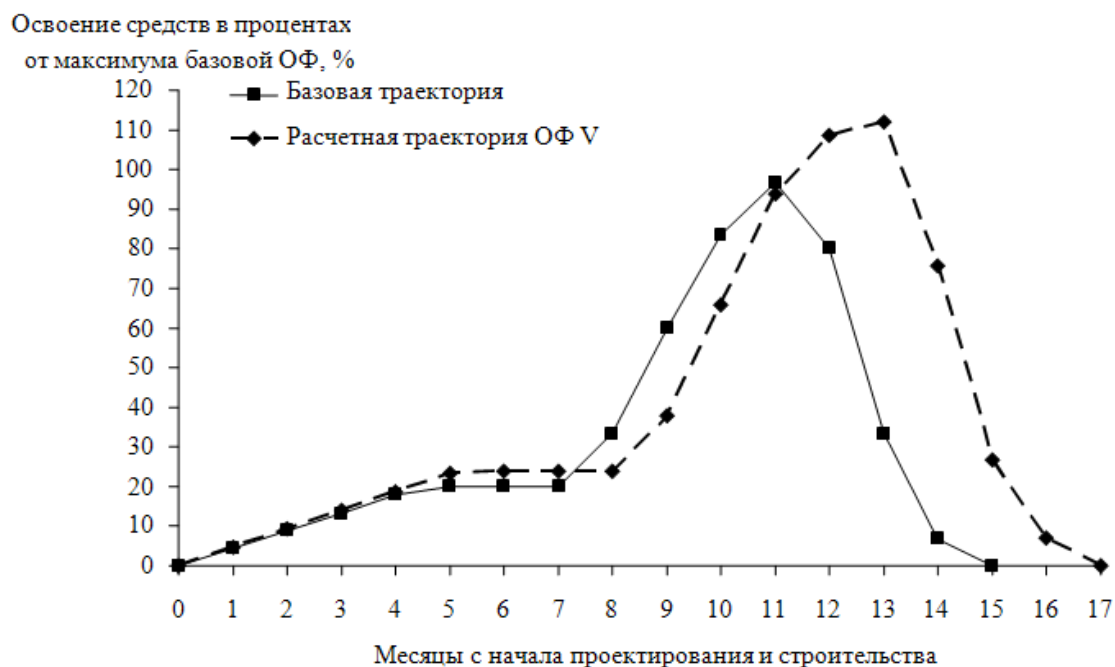


Рис. 2. Базовая и расчетная траектории предстоящего проекта – ОФ V

Аналогичным образом вырабатывали нормативные траектории и для отдельных видов работ и объектов, в частности, для электромонтажных и пуско-наладочных работ систем автоматизации.

Выработанные нормативные траектории принимались за основу при разработке сетевых графиков проектирования и строительства углеобогатительных фабрик. При этом применяли известные процедуры се-

тевого планирования в объединении с процедурами симплексного поиска при решении оптимизационных задач.

2. Постановка задачи натурно-модельного исследования эффективности стимулирующих функций.

Дано. 1. Набор структур стимулирующих функций $St_{i,j}(T)$ для выполнения операций:

а) линейная функция

$$St_{1,j} = a \cdot T_j + b, \quad (5)$$

б) кусочно-линейная функция

$$St_{2,j} = \begin{cases} a_1 \cdot T_j + b_1, & \text{при } T_j^{min} \leq T_j \leq T_{1,j}; \\ a_2 \cdot T_j + b_2, & \text{при } T_{1,j} < T_j \leq T_{2,j}; \\ a_3 \cdot T_j + b_3, & \text{при } T_{2,j} < T_j \leq T_j^H, \end{cases} \quad (6)$$

где $T_{1,j} = \frac{1}{3}(T_j^H - T_j^{min})$, $T_{2,j} = \frac{2}{3}(T_j^H - T_j^{min})$,

в) квадратичная функция

$$St_{3,j} = a \cdot T_j^2 + b \cdot T_j + c; \quad (7)$$

г) обратно пропорциональная функция

$$St_{4,j} = \frac{a}{T_j}, \quad (8)$$

где a, b, c – параметры функции, T_j – длительность выполнения j -й операции, T_j^{min} – минимальное время выполнения j -й операции, T_j^H – номинальное (в частности, фактическое) время выполнения j -й операции.

2. Данные о фактически реализованных проектах, включающие:

- сетевой график проектирования и строительства;
- номинальную стоимость C_j^H и номинальное время выполнения T_j^H операций;
- базовую структуру функции стимулирования $St_j^B(T)$, в частности, константу, С-типа [9];
- ограничения на длительность выполнения операций

$$T_j^{min} \leq T_j \leq T_j^H; \quad (9)$$

- ограничения на величину стимулирования при выполнении операций

$$0 \leq St_j \leq St_j^{max}, \quad (10)$$

где St_j^{max} – максимально возможное стимулирование j -й операции проекта;

- структуру функции дохода от функционирования предприятия после его вывода на проектные показатели $V(t)$.

3. Процедуры пересчетного моделирования, включающие:

- натурные данные о характеристиках выполненных проектов;
- пересчетные модели, позволяющие пересчитывать вариации исходных данных в изменение выходных целевых переменных;
- операции формирования модельных исходных и расчетных показателей.

4. Критерий эффективности выполнения проекта $Q(\Delta t)$, отражающий затраты и доход от создания промышленного комплекса

$$Q(\Delta t) = V(\Delta t) - St(\Delta t), \quad (11)$$

где Δt – время изменения длительности выполнения проекта, $V(\Delta t)$ – доход предприятия за время Δt , $St(\Delta t)$ – затраты на стимулирование по сокращению длительности проекта на Δt .

Требуется:

1. Разработать алгоритм определения эффективности стимулирующих функций.
2. Исследовать эффективность стимулирующих функций $St_{i,j}(T)$ из заданного набора по критерию $Q(\Delta t)$.

Для решения задачи натурно-модельного исследования эффективности стимулирующих функций разработан алгоритм оценки влияния стимулирующих функций на изменение эффективности выполнения проекта, структурная схема которого представлена на рисунке 3.

Программная реализация алгоритма осуществлена в среде Microsoft Project 2010 Professional и Microsoft Excel 2010 на языке VBA.

Результаты расчетов для выбранного набора стимулирующих функций представлены на рисунке 4, откуда следует вывод, что наилучшими являются квадратичная и кусочно-линейная функции стимулирования.

Для кусочно-линейной функции стимулирования для конкретной ОФ V получено оптимальное сокращение длительности Δt^{opt} на 57 дней при значении Q , равном 12459,12 тыс. руб., а для квадратичной – $\Delta t^{opt} = 54$ дня, $Q = 12134,47$ тыс. руб.

При изменении суточных доходов предприятия квадратичная и кусочно-линейная функции стимулирования также остаются предпочтительными и превосходят другие функции стимулирования по критерию эффективности Q не менее чем на 50 %.

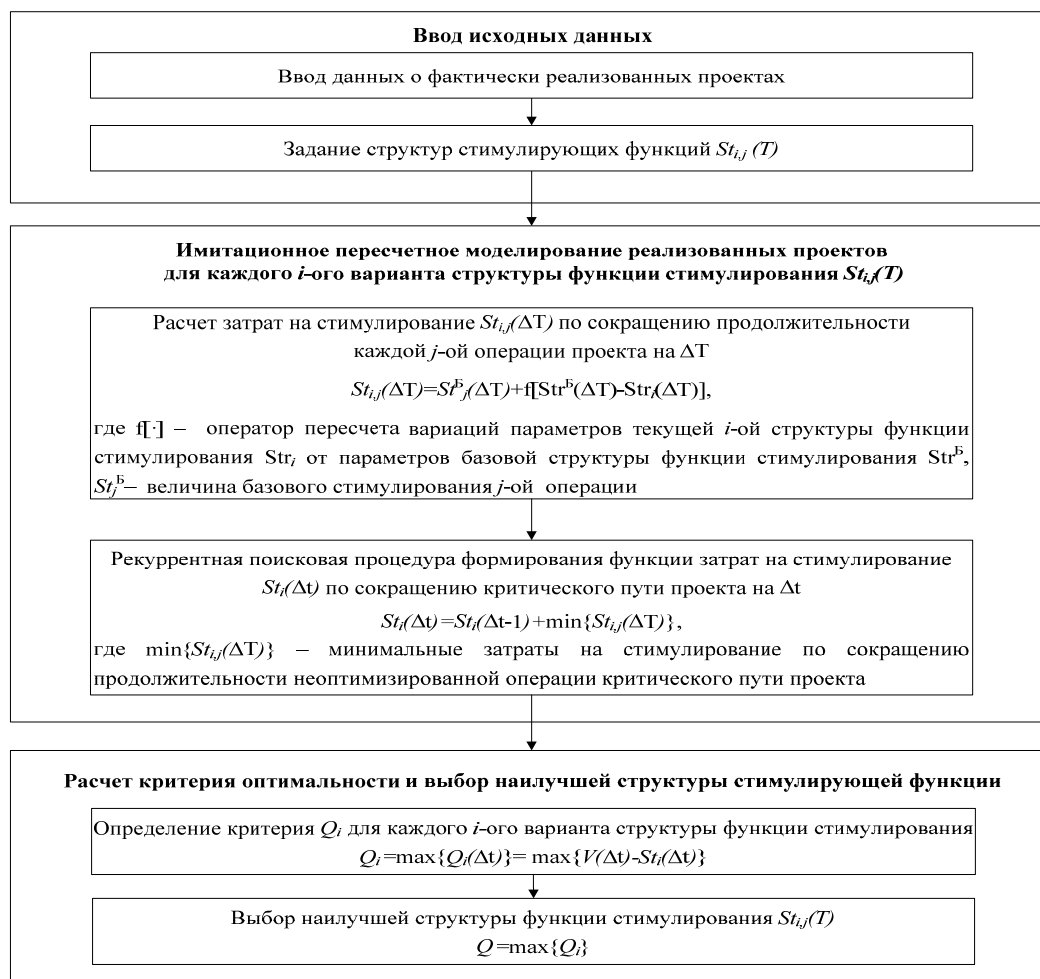


Рис. 3. Алгоритм определения эффективности стимулирующих функций

Критерий эффективности $Q(\Delta t)$, тыс. руб.

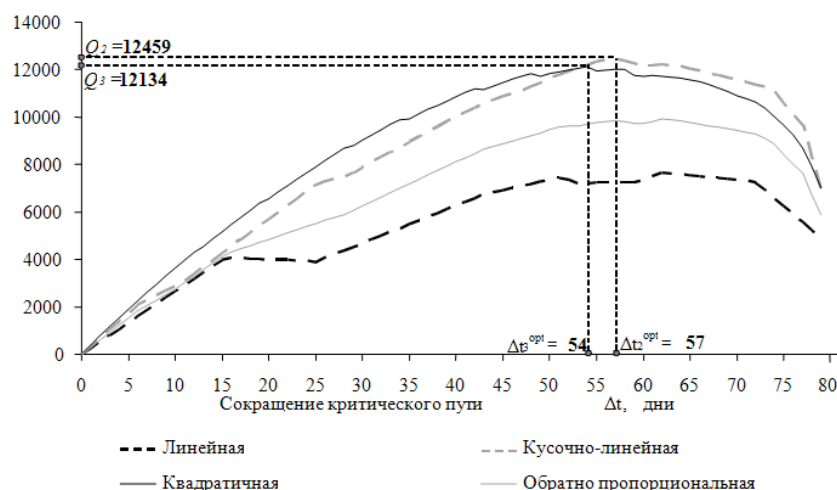


Рис. 4. Критерий эффективности при различных структурах функции стимулирования при суточном доходе предприятия 400 тыс. руб.

Основные выводы

Эффективным средством выработки план-графиков выполнения проектов по созданию крупных автоматизированных комплексов может служить имитационное натурно-математическое моделирование предшествующих проектов.

К числу определяющих факторов, влияющих на сроки выполнения отдельных работ и проектов в целом, относится стимулирование исполнителей работ. Предпочтительными из числа относительно простых и содержательно понятных функций стимулирования являются квадратичная и кусочно-линейная функции, применение которых дает возможность уменьшить сроки и затраты на выполнение проекта до 10 %.

Литература

1. Модер, Дж. Метод сетевого планирования в организации работ: пер. с англ. / Дж. Модер, С. Филлипс. – Л.: Издат, 1966.
2. Новиков, Д. А. Механизмы стимулирования в организационных системах / Д. А. Новиков. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 147 с.
3. Натурно-математическое моделирование в системах управления: учебное пособие / В. П. Авдеев, С. Р. Зельцер, В. Я. Карташов [и др.] – Кемерово: КемГУ, 1987. – 84 с.
4. Фельдбаум, А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. – М.: Физматгиз, 1963. – 552 с.
5. Планирование длительности выполнения проекта на основе ретроспективного анализа / Л. П. Мышляев, В. В. Грачев, А. А. Ивушкин, А. П. Бражников // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 2.2 (28).
6. Дамбраускас, А. П. Симплексный поиск / А. П. Дамбраускас. – М.: Энергия, 1979. – 175 с.
7. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: монография: в 3 т. – Т. 2: Системы автоматизации производственного назначения / под ред. Л. П. Мышляева. – Наука, 2006. – 483 с., ил.
8. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М.: Московский психолого-социальный институт, 2005. – 584 с.

Информация об авторах:

Ивушкин Анатолий Алексеевич – доктор технических наук, генеральный директор ОК «Сибшахтострой», т. 8(3843) 72-26-22, office@sshs.ru.

Ivushkin Anatoliy Alexeevich – Doctor of Technical Sciences, Executive Director of Sibshahtstroy company.

Шипунов Михаил Владимирович – начальник отдела систем управления производством ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», т. 8(3843)78-43-44, mihail.shipunov@nicsu.sibsiu.ru.

Shipunov Mikhail Vladimirovich – Head of the Department of production management systems at the Research centre for management systems.

Грачев Виталий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет, т. 8(3843)78-43-44, witgr@ngs.ru.

Grachev Vitaliy Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation and Information Systems of Siberian State Industrial University.

Мышляев Леонид Павлович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационному развитию, Сибирский государственный индустриальный университет, т. 8(3843) 46-58-83, sec_nr@sibsiu.ru.

Myshlyaev Leonid Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for Science and Innovations at Siberian State Industrial University.

**ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО КВАНТОВАНИЯ
В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА И
УПРАВЛЕНИЯ**

В. Я. Карташов, И. В. Бехтгольд

**APPLICATION OF MULTI-FREQUENCY QUANTIZATION IN DIGITAL SYSTEMS
OF MONITORING AND CONTROL**

V. Y. Kartashov, I. V. Bekhtgold

В статье предлагается один из подходов построения дискретной модели многомерного динамического объекта, удовлетворяющей принципу суперпозиции и использующей многочастотное квантование.

The article proposes an approach to constructing a multidimensional discrete model of a dynamic object that satisfies the principle of superposition, using multi-frequency quantization.

Ключевые слова: многочастотное квантование, дискретная модель, цифровые системы, непрерывные дроби, многомерные динамические объекты.

Keywords: multi-frequency quantization, discrete model, digital systems, continued fractions, multidimensional dynamic objects.

В цифровых системах реального времени в общем случае часто целесообразно иметь несколько квантовых устройств, которые практически трудно синхронизировать, а в большинстве случаев и необязательно стремиться к этому. Как отмечается в [7], к таким схемам квантования могут приводить многомерные системы контроля и управления со многими процессорами, системы со специальными элементами передачи информации или реальных измерений и т. п. Квантование в цифровых системах, осуществляемое с разными периодами дискретизации, получило название многочастотного квантования.

Успешное применение достижений теории цифровых систем при анализе и синтезе использования совокупности асинхронно выполняющихся процессов наталкивалось на невозможность исследования всей системы как единого целого. Это было обусловлено тем, что принципиально не был решен вопрос о сопоставлении таких процессов в однородных условиях, в частности, отсутствовало теоретическое обоснование перехода к синхронному анализу и синтезу таких процессов. В работе [7] упомянут подход для частного случая, когда отношения периодов дискретизации являются рациональными числами. В этом случае нетрудно показать существование «фундаментального» (основного) периода дискретизации и выразить все остальные периоды кратными этому периоду.

Для синхронизации процессов дискретизации и, тем самым, реализации многочастотного квантования, необходимо исследовать влияние вариации периода дискретизации Δt на математическую модель объекта и определить условия соответствия модели объекту. Прежде всего предположим, что объект моделирования является линейным или допускающим линеаризацию непрерывной динамической моделью. Пусть Δt_ν – некоторое значение периода дискретизации из числового множества $(0, \Delta t)$. Каждое Δt_ν определяет разбиение временного интервала динамического процесса $M_\nu = \{k \cdot \Delta t_\nu, k = 0, N_\nu\}$. При разных Δt_ν получим множество разбиений $\{M_\nu\}$ временного интервала $[0; T)$. Тогда будем говорить о соответствии дискретных моделей непрерывному объекту, если при фиксированном входном воздействии $x(t)$ существуют такие разбиения $\{M_\nu\}$, что для любого малого $\delta > 0$ выполняются соотношения на разбиениях:

$$|\delta(y(t), y^M(t))| < \delta, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} |\delta(y(t), y^M(t))| &= \\ &= \max_{M_\nu} |y(k\Delta t_\nu) - y^M(k\Delta t_\nu)|, \end{aligned} \quad (2)$$

$\Delta t_\nu \in (\Delta t_1; \Delta t_2)$; $y(t)$, $y^M(t)$ – выходная переменная объекта и модели соответственно. Эти требования соответствуют равномерной близости переходных процессов для $\Delta t_\nu \in (\Delta t_1; \Delta t_2)$ и определяют абсолютную погрешность на временном интервале $[0; T)$.

Для удовлетворения указанным условиям (1), (2) исследованы и установлены следующие взаимосвязи и соотношения [2, с. 5].

Установлено взаимнооднозначное соответствие между основной полосой s - плоскости преобразования Лапласа непрерывной передаточной функцией (НПФ) и z - плоскостью дискретной передаточной функцией (ДПФ), которое принципиально возможно только лишь при преобразовании $z = e^{s \cdot \Delta t}$, где Δt - период дискретизации в единицах времени (ед. врем.). При этом в силу многозначности отображения возникает необходимость построения римановой поверхности над z - плоскостью.

Применение согласованного z - преобразования при фиксированных нулях и полюсах НПФ в s - плоскости при вариации Δt в определенных пределах, позволяет взаимнооднозначному множеству нулей и полюсов ДПФ сохранить селективные свойства непрерывного объекта. Именно эти свойства позволяют рассмотреть бинарное отношение «быть моделью» как эквивалентное отношение [6]. В частности, это отношение обладает свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности. Выполнение первых двух свойств хорошо известно в моделировании в качестве понятия адекватности модели объекту, которое в достаточной степени разработано и используется на практике. В то же время свойство транзитивности, приводящее к появлению множества дискретных моделей, не реализовано на практике [5, с. 40 – 44].

Для реализации свойства транзитивности бинарного отношения «быть моделью» необходимо разработать формализованную процедуру нахождения ДПФ по измерениям входных и выходных переменных с периодом дискретизации Δt . При этом возникает следующая задача в детерминированном случае (измерения входных и выходных переменных объекта осуществляются без погрешностей):

- дано: результаты измерений в равноотстоящие моменты времени $\{x(n\Delta t); y(n\Delta t)\}$, где $n = 0, 1, 2, \dots$;
- требуется: определить дробно-рациональное приближение ДПФ динамического объекта, обладающего свойством интерполяционной зависимости.

Другими словами ДПФ определяем как отношение z - преобразований выходной переменной и входной переменной:

$$G_d(z, \Delta t) = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} y_n \cdot z^{-n}}{\sum_{n=0}^{\infty} x_n \cdot z^{-n}}. \quad (3)$$

Для отыскания ДПФ $G_d(z, \Delta t)$ требуется алгоритм совместной обработки приведенных в (3) временных рядов, так как в этом случае осуществляется оценка индивидуальных свойств динамического объекта. Всем указанным требованиям удовлетворяют алгоритмы теории непрерывных дробей [8], а именно, алгоритм В. Висковатова и его конкретизация к условиям задачи – модифицированный алгоритм В. Висковатова, которые являются основой подхода структурно-параметрической идентификации (SP-идентификации). Эти алгоритмы будут приведены далее при решении тестовых примеров.

Очевидно, что для любых значений периодов дискретизации Δt обсуждаемая здесь задача не имеет решения. Теоретическое исследование и решение многочисленных модельных и реальных задач позволили сформулировать дополнительные условия SP-идентифицируемости [2]:

Если предположить, что кроме действительных нулей и полюсов НПФ существуют комплексно-сопряженные, то мнимые части характеристических точек НПФ должны удовлетворять соотношению:

$$\Delta t \cdot \max \left(\operatorname{Im}[s_1^H, s_2^H, \dots, s_m^H, s_1^n, s_2^n, \dots, s_n^n] \right) < \pi, \quad (4)$$

где Δt – величина шага дискретизации, причем алгоритмы SP-идентификации восстанавливают и ДПФ и НПФ с определением их порядков и значений характеристических точек.

Замечание: для апериодических объектов приближенные условия SP-идентифицируемости несколько другие [8, с. 1].

Таким образом, сформулированные выше положения позволяют сформулировать утверждение, что для динамических объектов, рассматриваемых в работе, существует интервал значений периодов дискретизации $(\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max})$, зависящий от динамических свойств объекта, такой, что для любых $\Delta t \in (\Delta t_{\min}, \Delta t_{\max})$ определяются ДПФ и НПФ объекта, а, следовательно, выполняется условие транзитивности. В этом случае дискретные модели объекта получили название эквивалентных моделей.

Пример, иллюстрирующий понятие эквивалентных дискретных моделей. Как правило, в данном случае рассматривается одномерный динамический объект с входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ переменными. Для цифровых систем при идентификации объектов, выбирается ступенчатый идентифицирующий сигнал

$x(t) = 1(t)$, определяющий переходную характеристику объекта. Заметим, что при идентификации одномерного канала в многомерном объекте создаются условия или выбираются режимы постоянства других входных режимов. При проведении экспериментов по определению переходных характеристик можно экспериментально проверить справедливость свойства суперпозиции или оценить величину допустимых воздействий такого предположения.

В качестве динамического объекта рассмотрим аperiodический объект с НПФ $G(s) = \frac{2}{3 \cdot s + 2}$, параметры которого: коэффициент усиления $k = 1$ и постоянная времени $T = \frac{3}{2}$. На вход подаем ступенчатый сигнал $x(t) = 1(t)$, период дискретизации $\Delta t = 1,2$ ед. врем. Получив результаты измерений, определяем идентифицирующую матрицу со структурой:

<i>Строка времени</i>	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	...
<i>Значение входа (0 – строка)</i>	$x(0)$	$x(1)$	$x(2)$	$x(3)$	$x(4)$	...
<i>Значение выхода (1 – строка)</i>	$y(0)$	$y(1)$	$y(2)$	$y(3)$	$y(4)$	...
<i>Элементы матрицы</i>	$\alpha_2(0)$	$\alpha_2(1)$	$\alpha_2(2)$	$\alpha_2(3)$	$\alpha_2(4)$	...
	$\alpha_3(0)$	$\alpha_3(1)$	$\alpha_3(2)$	$\alpha_3(3)$	$\alpha_3(4)$	...
	...	...	...	...	...	...
	$\alpha_m(0)$	$\alpha_m(1)$	$\alpha_m(2)$	$\alpha_m(3)$	$\alpha_m(4)$	...
	$\alpha_{m+1}(0)$	$\alpha_{m+1}(1)$	$\alpha_{m+1}(2)$	$\alpha_{m+1}(3)$	$\alpha_{m+1}(4)$	...

(5)

Замечание 1. Элементы матрицы определяются по соотношению:

$$\alpha_m(n) = \frac{\alpha_{m-2}(n+1)}{\alpha_{m-2}(0)} - \frac{\alpha_{m-1}(n+1)}{\alpha_{m-1}(0)}, \quad (6)$$

$$\alpha_0(n) = x(n), \quad \alpha_1(n) = y(n).$$

Замечание 2: Если первые элементы строк нулевые, то осуществляется сдвиг строки влево до появления ненулевых элементов, при этом элемент сдвигаемой строки в непрерывной дроби умножается на z^{-k} (k – число нулей).

Замечание 3: Если элементы какой-либо $(m+1)$ строки – нулевые, то расчеты прекращаются, первый столбец определяет конечную непрерывную дробь:

$$G(z, \Delta t) = \frac{y(0)}{x(0)} + \frac{1}{\alpha_2(0) \cdot z^{-1}} + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{\alpha_m(0) \cdot z^{-1}}, \quad (7)$$

сворачивая которую снизу-вверх, определяем ДПФ объекта, его характеристические свойства и дискретную математическую модель.

В примере при $\Delta t = 1,2$ ед. врем. идентифицирующая матрица:

t	0	1,2	2,4	3,6	4,8
x	1	1	1	1	1
y	0,55	0,8	0,91	0,96	–
α_1	–0,454545	–0,654545	–0,745455	–	–
α_2 ("0" – строка)	0,01	0,01	–	–	–

Тогда $G(z; 1,2) = \frac{0,55 \cdot z^{-1}}{1 - 0,45 \cdot z^{-1}}$ из которой имеем $z^n = 0,45$, $s^n = -0,67$,

$$G_n(s) = \frac{1}{s + 0.67} \cong \frac{2}{3 \cdot s + 2}.$$

Изменим $\Delta t = 0,5$ ед. врем., тогда идентифицирующая матрица:

t	0	0,5	1	1,5
x	1	1	1	1
y	0,28	0,49	0,63	0,74
α_1	-0,71653	-1,229948	-1,597826	-
α_2	≈ 0	≈ 0	-	-

Тогда ДПФ $G(z; 0,5) \cong \frac{0.28 \cdot z^{-1}}{1 - 0,72 \cdot z^{-1}}$, тогда $z^n = 0,72$; $s^n = -0,66$;

$$G_n(s) = \frac{1}{s + 0.66} \approx \frac{2}{3 \cdot s + 2}.$$

Из приведенных расчетов можно сделать вывод, что для любых $\Delta t \in [0,5; 1,2]$ НПФ $G_n(s)$ будет одна и та же (с точностью до погрешностей расчета), а ДПФ и дискретных моделей бесконечно много. Границы отрезка можно уточнить, выбрав $\Delta t < 0,5$ или $\Delta t > 1,2$ и используя поисковые методы.

В общем случае рассмотрим многомерный динамический объект, который допускает линеаризацию и имеет M входных воздействий $x_m(t)$ и, не нарушая общности, одну управляемую (выходную) переменную $y(t)$.

Влияние входного воздействия $x_m(t)$ на изменение выходной переменной $y(t)$ при условии приближенного постоянства других входных воздействий условно назовем m -ым динамическим каналом объекта $(x_m(t); y(t))$. Предполагается, что квантование по времени динамических каналов можно осуществлять как отдельно, так и в совокупности. Требуется построить линейную модель рассматриваемого объекта, при условии отсутствия погрешностей измерения.

Решение поставленной задачи предполагает выполнение следующих этапов алгоритма.

1. Для каждого отдельного канала при условии, что на других каналах каким-либо образом поддерживались постоянные (приблизительно) уровни, осуществлялось ступенчатое возмущение с целью получения переходной характеристики канала.

2. С помощью цифровой техники (ПЛК, промышленные контроллеры и т. п.) осуществляется квантование по времени с периодом квантования Δt_m . Квантование может быть различным по характеру. Например, если Δt_m брать малым, то другие значения периодов дискретизации можно брать с помощью операции децимации. Возможен вариант независимого выбора значений Δt_m .

3. Таким образом, для каждого Δt_m имеются переходные характеристики

$$(x_m(k \cdot \Delta t_m); y(k \cdot \Delta t_m)),$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

К полученным измерениям применяем алгоритм SP-идентификации (например, модифицированный алгоритм В. Висковатова). Находим по идентифицирующей матрице ДПФ $G_m(z; \Delta t_m)$. По полученной $G_m(z; \Delta t_m)$ восстанавливаем $G_m(s)$ и для этих передаточных функций находим их нули и полюса. Изменяем $\Delta t_m = \Delta t_{m1}$ и повторяем предыдущие операции, определяем $G_{m1}(\Delta t_{m1}; z)$ и $G_{m1}(s)$ и их характеристические точки.

4. Для m -ного канала находим общую неизменную часть $G_m(s)$, имеющие одинаковые нули и полюса НПФ, а также оцениваем интервал значений периодов дискретизации $(\Delta t_{m \min}; \Delta t_{m \max})$. Это можно сделать с помощью поисковых методов, приближенных соотношений [7, 1] или комбинированных алгоритмов.

5. Определяем общий интервал значений периодов дискретизации для всех каналов динамического объекта, на котором выполняется эквивалентность дискретных моделей:

$$(\Delta t_{0\min}; \Delta t_{0\max}) = \bigcap_{m=1}^M (\Delta t_{m\min}; \Delta t_{m\max}).$$

Если $(\Delta t_{0\min}; \Delta t_{0\max}) = \emptyset$, то задача решений не имеет. В противном случае, выбираем требуемое значение периода Δt_0 (возможен вариант выбора таких периодов квантования в виде некоторой совокупности).

6. Зная для каждого m -ного динамического канала $G_m(s)$ и период Δt_0 , с помощью модифицированного метода В. Вискватова, находим ДПФ $G_m(\Delta t_0; z)$.

7. Окончательный этап формирует характеристический многочлен многомерного объекта путем умножения и числителя и знаменателя ДПФ на недостающие члены $(z - z^n)$, где z^n находится из соотношения согласованного z -преобразования:

$$z_n = e^{s_n \cdot \Delta t}, \quad (8)$$

где s_n – недостающие до полного характеристического многочлена полюса модели.

Приведем тестовые исследования предложенного алгоритма для двумерного линейного динамического объекта. Пусть дан объект (рис. 1).

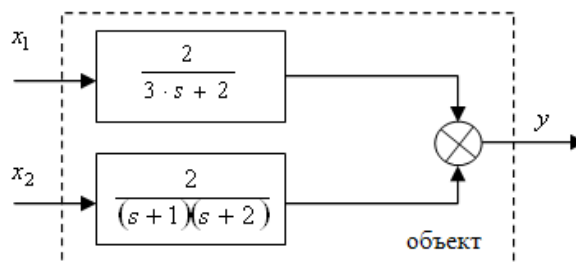


Рис. 1. Структурная схема тестового линейного объекта

Первый канал объекта $(x_1(t); y(t))$ имеет передаточную функцию $G_1(s) = \frac{2}{3 \cdot s + 2}$. Рассматривается детерминированный случай. При идентификации первого канала период дискретизации был $\Delta t_{11} = 1,2$ ед. врем. и $\Delta t_{12} = 0,5$ ед. времени для второго канала $\Delta t_{21} = 1$ ед. врем., $\Delta t_{22} = 0,5$ ед. времени. Требуется в общем случае построить дискретную модель и определить реакцию этого объекта на определенный вид входных сигналов. Для демонстрации возможностей подхода выбран объект, для которого уже часть расчетов проведены. В то же время все этапы алгоритма будут представлены в полном объеме.

В частности, первый канал ранее идентифицирован:

а) для $t_{11} = 1,2$ ед. врем.

время		0	1,2	2,4	3,6	4,8
вход	$x_1(t)$	1	1	1	1	1
выход	$y(t)$	0	0,55	0,8	0,91	0,96

б) для $t_{12} = 0,5$ ед. врем.

время		0	0,5	1	1,5	2
вход	$x_1(t)$	1	1	1	1	1
выход	$y(t)$	0,28	0,49	0,63	0,74	–

Анализ результатов идентификации приводит к выводу, что если период квантования $\Delta t \in [0,5;1,2]$, то бесконечное множество дискретных моделей эквивалентно динамическому объекту с непрерывной передаточной функцией $G_1(s) = \frac{2}{3 \cdot s + 2}$ при входном ступенчатом воздействии $x_1(t) = 1(t)$.

Второй канал объекта $(x_2(t); y(t))$ идентифицируется при периодах квантования $\Delta t_{21} = 1$ ед. врем. и $\Delta t_{22} = 0,5$ ед. врем.:

для $\Delta t_{21} = 1$ ед. врем. идентифицирующая матрица имеет вид:

время	0	1	2	3	4	5
вход $x_2(t)$	1	1	1	1	1	1
выход $y(t)$	← 0	0,4	0,75	0,9	0,96	0,99
α_1	0,399576	0,747645	0,902505	0,963704	0,98657	0,995049
α_2	-0,871094	-1,259655	1,411815	-1,469038	-1,490259	—
α_3	0,425034	0,638917	0,725386	0,758249	—	—
α_4	-0,057155	-0,085916	-0,097543	—	—	—
	≈ 0	≈ 0	—	—	—	—

Так как последняя строка содержит элементы, величина которых близка к нулю, то далее расчеты не проводятся в соответствии со сформулированным правилом останова. Тогда ДПФ канала аппроксимируется элементами первого столбца полученной матрицы, порождающими конечную правильную С-дробь:

$$G_2(z;1) = \frac{0,399576z^{-1}}{1 + \frac{-0,871094z^{-1}}{1 + \frac{0,42503z^{-1}}{1 - 0,057153z^{-1}}}},$$

вернув которую алгоритмом «снизу-вверх» получаем ДПФ:

$$\begin{aligned} G_2(z;1) &= \frac{0,399576z^{-1} + 0,146995z^{-2}}{1 - 0,503215z^{-1} + 0,049787z^{-2}} \cong \\ &\cong \frac{0,4z^{-1} + 0,147z^{-2}}{1 - 0,5z^{-1} + 0,05z^{-2}}. \end{aligned}$$

Для $\Delta t_{22} = 0,5$ ед. врем. идентифицирующая матрица с учетом входного ступенчатого воздействия $1(t)$ примет вид (приводится без округления):

время	0	0,5	1	1,5	2	2,5
вход $x_2(t)$	1	1	1	1	1	1
выход $y(t)$	0,154818	0,399576	0,60327	0,747645	0,842508	0,902905
α_1	-1,580941	-2,898295	-3,829183	-4,442308	-4,832034	—
α_2	0,747668	1,476204	2,019269	2,385879	—	—
α_3	-0,141139	-0,278725	-0,38118	—	—	—
	≈ 0	≈ 0	—	—	—	—

Аналогично предыдущему случаю получаем ДПФ:

$$\begin{aligned} G_2(z;0,5) &= \frac{0,154818z^{-1} + 0,093901z^{-2}}{1 - 0,97441z^{-1} + 0,22313z^{-2}} \cong \\ &\cong \frac{0,155z^{-1} + 0,094z^{-2}}{1 - 0,975z^{-1} + 0,223z^{-2}}, \end{aligned}$$

которая имеет отрицательный нуль $z_1^n = -0,607$ и нуль $z_1^n = 0$, два полюса: $z_1^n = 0,367879$ и $z_2^n = 0,60653$ и, соответственно, в z -плоскости для данного объекта нулей нет, а полюса принимают значения $s_1^n = -2$, $s_2^n = -1$. Дискретная модель в форме разностного уравнения восстанавливает значения выходной переменной с относительной погрешностью $\Delta \leq 0,1\%$. Заметим, что особенностью получения дробно-рациональной аппроксимации при ступенчатом воздействии в числителе появляются отрицательные нули, которые пока не удается восстановить на прогностической основе. Это требует определять их расчетным путем по алгоритму В. Висковатова.

Для построения двухмерной дискретной модели рассматриваемого объекта, сначала требуется выбрать синхронизированный период дискретизации из $(\Delta t_{0\min}; \Delta t_{0\max})$ (соотношение (8)). Из условий задачи управления или задачи мониторинга для конкретного динамического объекта назначаем, например, $\Delta t = 1$ ед. врем.

Для первого канала, в силу того, что это аperiodический объект первого порядка (так как нет необходимости искать нули в числителе), можно поступить следующим образом: из согласованного z -преобразования искомый z_n для $\Delta t = 1$ ед. врем., находим из условия постоянства полюса для динамического объекта, т. е. так как $s_n = 0,67$, то $\ln z_n = \frac{\Delta t}{\Delta t_1} \ln z_{n1}$. В нашем случае $\Delta t_1 = 1,2$ ед. врем.

$z_{n1} \cong 0,45$, $\Delta t = 1$ ед. врем., тогда $z_n \cong 0,51$. Тогда из условия, что коэффициент передачи первого канала $k_1 = 1$, окончательно получаем $(G_{(1;1)} = k_1 = 1)$,

$$G_1(z;1) \cong \frac{0,49z^{-1}}{1 - 0,51z^{-1}}, \quad (9)$$

а для второго канала уже имеется передаточная функция, полученная ранее:

$$G_2(z;1) \cong \frac{0,4z^{-1} + 0,147z^{-2}}{1 - 0,5z^{-1} + 0,05z^{-2}}. \quad (10)$$

Заметим, что если такого $G_2(z;1)$ не было, то необходимо было перейти к НПФ, после чего найти переходную характеристику, а затем, с помощью алгоритма В. Висковатова, получить искомую ДПФ.

Тогда после операции синхронизации, осуществимой из свойства транзитивности условия эквивалентности дискретных моделей, получим общую модель объекта $y(z;1) = y_1(z;1) + y_2(z;1)$, где

$$\begin{aligned} y_1(z;1) &= G_1(z;1) \cdot x_1(z;1), \\ \text{а } y_2(z;1) &= G_2(z;1) \cdot x_2(z;1). \end{aligned}$$

Тогда, с учетом получения общего характеристического полинома объекта, получим:

$$\begin{aligned} y(z;1) &= \\ &= \frac{0,40z^{-1}(1 - 0,5z^{-1} + 0,05z^{-2})}{(1 - 0,51z^{-1})(1 - 0,5z^{-1} + 0,05z^{-2})} x_1(z;1) + \\ &+ \frac{(0,4z^{-1} + 0,47z^{-2})(1 - 0,51z^{-1})}{(1 - 0,5z^{-1} + 0,05z^{-2})(1 - 0,51z^{-1})} x_2(z;1) = \\ &= \frac{0,49z^{-1} - 0,245z^{-2} + 0,0245z^{-3}}{1 - 1,01z^{-1} + 0,305z^{-2} - 0,0255z^{-3}} x_1(z;1) + \\ &+ \frac{0,4z^{-1} - 0,057z^{-2} - 0,075z^{-3}}{1 - 1,01z^{-1} + 0,305z^{-2} - 0,0255z^{-3}} x_2(z;1). \end{aligned} \quad (11)$$

Для конкретизации результатов положим:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \begin{cases} 0,5 & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases}, \\ \text{а } x_1(t) &= \begin{cases} 2 & \text{при } t \geq 3 \\ 0 & \text{при } t < 3 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

В этом случае дискретная математическая модель примет вид:

$$\begin{aligned}
 y(n) = & 1,01 \cdot y(n-1) - 0,305 \cdot y(n-2) + \\
 & + 0,0255 \cdot y(n-3) + \\
 & + 0,49 \cdot x_1(n-1) - 0,245 \cdot x_1(n-2) + \\
 & + 0,0245 \cdot x_1(n-3) + \\
 & + 0,4 \cdot x_2(n-1) - 0,057 \cdot x_2(n-2) - \\
 & - 0,075 \cdot x_2(n-3).
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Учитывая соотношения (12), получим следующие сопоставительные результаты (таблица 1).

Таблица 1

Результаты расчетов

Время	0	1	2	3	4	5	6	7
$x_1(t)$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$x_2(t)$	0	0	0	2	2	2	2	2
$y(t)$	0	0,243	0,368	0,432	1,264	1,977	2,297	2,423
$y^M(t)$	0	0,243	0,368	0,433	1,266	1,977	2,292	2,415

Как видно из приведенных результатов в таблице 1, максимальная относительная погрешность, определяемая из соотношения:

$$\Delta = \frac{|y(n) - y^M(n)|}{y(n)} 100 \%,$$

не превосходит $\Delta \leq 0,4\%$, что связано с погрешностями округлений и расчетов.

Таким образом, в работе, прежде всего, предложен алгоритм использования бинарного отношения «быть моделью» и предложен механизм реализации свойства транзитивности множества дискретных моделей при вариации периода квантования по времени. Именно эти и другие свойства позволили ввести понятие эквивалентности дискретных моделей. В частности, неиспользование эквивалентности не позволяет в полной мере применять на практике многочастотное квантование в цифровых системах как один из подходов построения высокоэффективных систем.

Литература

- Бехтгольд, И. В. Некоторые аспекты выбора шага дискретизации при идентификации линейных объектов / И. В. Бехтгольд, Д. Ю. Сахнин // Краевые задачи и математическое моделирование: тематический сборник научных статей. – Новокузнецк: НФИ ГОУ ВПО КемГУ, 2010. – Т. 3.
- Карташов, В. Я. Влияние периода дискретизации на структурно-параметрическое взаимодействие между непрерывной и дискретной по времени моделями линейного динамического объекта / В. Я. Карташов, О. Н. Инденко, А. В. Александров. – Барнаул: АлГУ, 1996. – 36 с.
- Карташов, В. Я. Непрерывные дроби (определения и свойства): учебное пособие / В. Я. Карташов. – Кемерово: КемГУ, 1999. – 88 с.
- Карташов, В. Я. Математическое моделирование технологических процессов: учебно-методическое пособие для магистров / В. Я. Карташов, Д. Ю. Сахнин. – Кемерово: КемГУ, 2011. – 56 с.
- Карташов, В. Я. Эквивалентность дискретных моделей – реальность? / В. Я. Карташов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 8.
- Кочубиевский, И. Д. Системы нагружения для исследования и испытаний машин и механизмов / И. Д. Кочубиевский – М.: Машиностроение, 1985. – 221 с.
- Острем, К. Системы управления с ЭВМ / К. Острем, Б. Виттенмарк. – М.: Мир, 1987. – 480 с.
- Сахнин, Д. Ю. Влияние квантования на принцип эквивалентности / Д. Ю. Сахнин, М. А. Сахнина // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции AS'2009. – Новокузнецк, 2009.

Информация об авторах:

Карташов Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации исследований и технической кибернетики, КемГУ, т. 8-905-949-2136, v.kartashov.aitek@gmail.com.

Kartashov Vladimir Yakovlevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Research Automation and Technical Cybernetics of KemSU.

Бехтгольд Игорь Владимирович – аспирант кафедры автоматизации исследований и технической кибернетики, КемГУ, т. 8-950-271-2167, behtgold@gmail.com.

Bekhtgold Igor Vladimirovich – post-graduate student at the Department of Research Automation and Technical Cybernetics of KemSU.

УДК 517.545

РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВ ДИФФЕРЕНЦИАЛОВ ПРИМА С ПЕРЕМЕННЫМ ДИВИЗОРОМ

М. В. Комарова

DIMENSIONS OF PRYM DIFFERENTIALS SPACES WITH VARIABLE DIVISORS

M. V. Komarova

Пространства мероморфных абелевых дифференциалов на компактной римановой поверхности с проколами находят применение в теоретической физике и в уравнениях математической физики.

В работе В. В. Чуешева найдены размерности $i_{\rho,k}(D)$ пространств $\Omega_{\rho}^k(D)$, состоящих из мероморфных k -дифференциалов Прима для характера ρ , кратных дивизору D на F , в случае, когда $\deg D = (2g - 2)k$, $k \geq 0, k \in N$.

В данной работе найдены размерности $i_{\rho,k}(D)$ для любых дивизоров D , как положительных, так и отрицательных переменных степеней.

Spaces of meromorphic abelian differentials on a compact Riemann surface with punctures find application in theoretical physics and in the equations of mathematical physics.

In V. V. Chuyeshev's work $i_{\rho,k}(D)$ dimensions of $\Omega_{\rho}^k(D)$ spaces, consisting of Prym meromorphic k -differentials for the character ρ , multiple to a divisor D on F , when $\deg D = (2g - 2)k$, $k \geq 0, k \in N$, have been found.

In this article dimensions $i_{\rho,k}(D)$ for any divisors D for the character ρ , both of positive, and negative variable degrees, have been found.

Ключевые слова: компактная риманова поверхность, абелевы дифференциалы, дифференциалы Прима для характеров.

Keywords: compact Riemann surfaces, abelian differentials, Prym differentials for characters.

Введение

Пространства мероморфных абелевых дифференциалов на компактной римановой поверхности F с проколами находят применение в теоретической физике и в уравнениях математической физики [1, 2, 3].

В [4] найдены размерности $i_{\rho,k}(D)$ пространств $\Omega_{\rho}^k(D)$, состоящих из мероморфных k -дифференциалов Прима для ρ , кратных дивизору D на F , в случае, когда:

$$\deg D = (2g - 2)k, k \geq 0, k \in N.$$

Цель работы – найти размерности $i_{\rho,k}(D)$ для любых дивизоров D , как положительных, так и отрицательных переменных степеней.

1. Предварительные сведения

Определение 1.1. (Абстрактная) риманова поверхность есть пара (F, Σ) , состоящая из комплексно аналитической структуры Σ на двумерной поверхности F . Часто для краткости вместо (F, Σ) пишут F .

Определение 1.2. Пусть $k \in Z$. Мероморфным k -дифференциалом ω на римановой поверхности F называется закон, сопоставляющий каждой локальной координате z на F мероморфную функцию $f(z)$ такую,

что выражение $f(z)dz^k$ будет инвариантно относительно замен локального параметра z на F . Для $k = 1$ такие дифференциалы называются абелевыми [3].

Дивизором на римановой поверхности F называется формальное произведение

$$D = P_1^{n_1} \dots P_k^{n_k}, P_j \in F, n_j \in \mathbb{Z}, j = 1, \dots, k.$$

Обозначим через $Div(F)$ группу дивизоров на F с операцией умножения дивизоров. Она является свободной коммутативной группой. Единица в $Div(F)$ будет обозначаться 1 (пустой дивизор). Для каждого

дивизора D определена степень $\deg D = \sum_{j=1}^k n_j$.

Степень $\deg$ задает гомоморфизм из группы $(Div(F), +)$ в $(\mathbb{Z}, +)$. Если $f \in M^*(F)$, т. е. f – мероморфная функция на F , не являющаяся тождественным нулем, то определен ее дивизор $(f) = \sum_{P \in F} \text{ord}_P f \cdot P \in Div(F)$.

Отсюда получаем гомоморфизм $()$ из $M^*(F)$ в группу $Div_0(F)$ (группу дивизоров степени 0), так как число нулей равно числу полюсов для мероморфной функции (с учетом кратности). Обозначим через $DivH(F)$ образ по отображению $()$ для $M^*(F)$. Дивизоры из $DivH(F)$ называют главными, то есть дивизорами для однозначных мероморфных функций на F . Фактор-группа $Div(F) / DivH(F)$ называется группой классов дивизоров.

Определение 1.3. Два дивизора D и D_1 называются линейно эквивалентными ($D \sim D_1$), если D/D_1 – главный дивизор на F .

Для любого дивизора D на F вводится комплексное векторное пространство

$L(D) = \{f \in M(F) : (f) \geq D\}$. $i_k(D) = \dim_{\mathbb{C}} \Omega^k(D)$ Его размерность $r(D)$ будем называть размерностью дивизора D . Также для любого $D \in Div(F)$ вводится комплексное векторное пространство $\Omega^k(D)$, состоящее из ω таких, что ω – абелев k -дифференциал на F с $i_k(D) = \dim_{\mathbb{C}} \Omega^k(D)$ ($\omega \geq D$). Его размерность $i_k(D) = \dim_{\mathbb{C}} \Omega^k(D)$ называется индексом специальности для дивизора D при $k=1$ $i_1(D) = \dim_{\mathbb{C}} \Omega^1(D)$.

Для краткости будем писать $\Omega^1(D) = \Omega(D)$ и $i_1(D) = i(D)$.

Определение 1.4. Отображение Якоби $\phi: F \rightarrow J(F)$ определяется по формуле:

$$\phi(P) = \int_{P_0}^P \zeta = \left(\int_{P_0}^P \zeta_1, \dots, \int_{P_0}^P \zeta_g \right) \in C^g,$$

где P_0 – фиксированная точка на F и пути интегрирования берутся одинаковыми для всех координат, а $\zeta_1, \dots, \zeta_g$ – базис голоморфных 1-дифференциалов на F , и $J(F)$ – многообразие Якоби для F [3,5].

Теорема (Римана–Роха) [3,4]. Пусть F – компактная риманова поверхность рода g , $g > 0$. Тогда верно равенство $r(D^{-1}) = \deg D - g + 1 + i(D)$.

Теорема (Г. Абеля) [3]. Пусть $D \in Div(F)$. Тогда D – главный дивизор на компактной римановой поверхности F рода $g \geq 1$, если и только если $\deg D = 0$ и $\phi(D) = 0$, где ϕ – отображение Якоби для F .

Определение 1.5. Характером ρ на фундаментальной группе $\pi_1(F)$ для компактной римановой поверхности F называется любой гомоморфизм из группы $\pi_1(F)$ в мультипликативную группу $C^* = C \setminus \{0\}$, поля комплексных чисел C .

Опишем, прежде всего, мультипликативные функции f , не имеющие ни нулей, ни полюсов. Если f – мультипликативная функция на F без нулей и полюсов, то $\frac{df}{f}$ – голоморфный абелев дифференциал.

Отсюда $\frac{df}{f} = \sum_{j=1}^g c_j \zeta_j$, а значит

$$f(P) = f(P_0) \exp \int_{P_0}^P \sum_{j=1}^g c_j \zeta_j,$$

$$c_j \in C, j = 1, \dots, g.$$

Учитывая выбор канонического базиса $\{\zeta_j\}_{j=1}^g$, для канонического гомологического базиса $a_1, \dots, a_g, b_1, \dots, b_g$ петель на F [3], получим, что характер ρ для f имеет вид:

$$\rho(a_k) = \exp c_k, \rho(b_k) = \exp\left(\sum_{j=1}^g c_j \pi_{jk}\right), k=1, \dots, g, \text{ где } \pi_{jk} = \int_{b_k} \zeta_j, j, k=1, \dots, g. \text{ Будем называть такие}$$

характеры ρ несущественными, а f (с таким характером) – единицей. Характеры, которые не являются несущественными, будем называть существенными на $\pi_1(F)$.

Для любого дивизора D обозначим через $r_\rho(D^{-1})$ и $i_{\rho,k}(D)$ и размерности векторных пространств, состоящих из функций f и (ρ, k) – дифференциалов ω для ρ таких, что $(f) \geq D^{-1}$ и $(\omega) \geq D$ на F соответственно.

Теорема (Римана – Роха для характеров) [3]. Пусть F – компактная риманова поверхность рода $g \geq 1$. Тогда для любого дивизора D на F и любого характера $\rho, \rho \neq 1$, верно равенство:

$$r_\rho(D^{-1}) = \deg D - g + 1 + i_{\rho^{-1}}(D).$$

Определение 1.6. Мероморфным (ρ, k) –дифференциалом Прима на F для ρ называется однозначная мероморфная дифференциальная k –форма $\varphi = \varphi(z)dz^k$ на круге U такая, что

$$\varphi(Tz)(dTz)^k = \rho(T)\varphi(z)dz^k, T \in \Gamma, z \in U, k \in \mathbb{Z},$$

где Γ – фуксова группа первого рода инвариантно действующая в круге U и униформизирующая F в U , т. е. $U/\Gamma = F$.

Теорема (Римана–Роха для (ρ, k) –дифференциалов и характеров) [4]. Для любых $g > 0$ и $k \in \mathbb{Z}$ верно равенство

$$i_{\rho,k}(D) = (g-1)(2k-1) - \deg D + i((f)Z^k / D) = (g-1)(2k-1) - \deg D + r((f)Z^{k-1} / D)$$

при любом характере ρ на компактной римановой поверхности F рода g , где f – любая мультипликативная функция для $\rho, f \neq 0$, Z – канонический класс дивизоров абелевых дифференциалов на F .

Предложение 1.1 [3]. Если $\deg D > 0$, то $r(D) = 0$.

В частности, если $D=1$ и ρ – несущественный характер, т. е. существует мультипликативная единица f для ρ , где $(f)=1$, то при $k > 1$ и $g \geq 2$ верно равенство

$$i_{\rho,k}(1) = (g-1)(2k-1) + r(Z^{k-1}) = (2k-1)(g-1),$$

так как $\deg Z^{k-1} = (k-1)(2g-2) > 0$.

Предложение 1.2 [3]. Если $\deg D = 0$, то $r(D)=1$, если D главный и $r(D)=0$, если D неглавный.

2. Нахождение размерности $i_{\rho,k}(D)$ для переменного дивизора D

Случай $\deg D < 0$ рассмотрим отдельно.

Предложение 2.1. Для любого дивизора D , $n = \deg D < 0$ верно равенство $i_{\rho,k}(D) = (2k-1)(g-1) + n > 0$, для любых характеров $\rho, k \geq 1$ и $g \geq 2$.

Доказательство. По теореме Римана–Роха для (ρ, k) –дифференциалов верно равенство:

$$i_{\rho,k}(D) = (g-1)(2k-1) - \deg D + r((f)Z^{k-1} / D) = (g-1)(2k-1) + n > 0.$$

Здесь $r\left((f)\frac{Z^{k-1}}{D}\right) = 0$, так как

$$\deg(f)\frac{Z^{k-1}}{D} = 0 + (k-1)(2g-2) - \deg D = (k-1)(2g-2) + n > 0.$$

Предложение доказано.

В дальнейшем будем рассматривать любые дивизоры степеней $n = \deg D \geq 0$.

Случай $k=1$. Составим таблицу из $i_{\rho,1}(D)$ для $\deg D = n$.

Пусть $n > 2g-2$, тогда имеем $i_{\rho,1}(D) = 0$ при $\deg D = 2g-2+m, m=1,2,\dots$. Действительно, если существует $\omega \neq 0$ такой, что $(\omega) \geq D$, то $\deg(\omega) \geq \deg D$. Отсюда получаем, что верно неравенство $2g-2 \geq 2g-2+m$. Противоречие. Следовательно, в этом случае $i_{\rho,1}(D) = 0$.

Случай $n = 2g - 2$ рассмотрен в таблице 3.1 в [4].

Пусть $0 < n < 2g - 2$, тогда используя теорему Римана–Роха получим, что

$$i_{\rho,1}(D) = (g-1) - n + r\left(\frac{D_0 Z^0}{D}\right).$$

Если ρ – несущественный характер, то

$$i_{\rho,1}(D) = i(D) = (g-1) - n + r\left(\frac{1}{D}\right),$$

где $D_0 = (f) = 1$ и f – мультипликативная единица для ρ на F .

Если ρ – существенный характер, то $i_{\rho,1}(D) = g - 1 - n + r\left(\frac{D_0}{D}\right)$,

где $D_0 = (f) \neq 1$, f – мультипликативная функция для ρ на F .

Таким образом, с учетом [4], доказана теорема о размерности $i_{\rho,1}(D)$, которую удобно сформулировать в виде таблицы 1.

Таблица 1

Для размерности $i_{\rho,1}(D)$

g≥2	deg D = n	Несущественный характер		Существенный характер	
	n > 2g - 2	0			
	0 < n < 2g - 2	$g - 1 - n + r\left(\frac{1}{D}\right)$		$g - 1 - n + r\left(\frac{D_0}{D}\right)$	
	n = 2g - 2	D~Z	D ∄ Z	D~D0Z	D ∄ D0Z
		1	$r\left(\frac{1}{D}\right) - g + 1$	1	$r\left(\frac{D_0}{D}\right) - g + 1$

Случай $k=2$. Составим таблицу из размерностей $i_{\rho,2}(D)$.

Пусть $\deg D = n > (2g - 2)2$, тогда имеем $i_{\rho,2}(D) = 0$ при $\deg D = (2g - 2)2 + m$, $m = 1, 2, \dots$

Так как, если существует $\omega \neq 0$ такое, что $(\omega) \geq D$, то $\deg(\omega) \geq \deg D$ и $(2g - 2)2 \geq (2g - 2)2 + m$. Противоречие. Следовательно, в этом случае $i_{\rho,2}(D) = 0$.

Пусть $0 < n < 2g - 2$, тогда используя теорему Римана–Роха для (ρ, k) -дифференциалов, получим, что верно равенство

$$i_{\rho,2}(D) = (2 \cdot 2 - 1)(g - 1) - \deg D + r\left((f) \frac{Z^{2-1}}{D}\right) = 3(g - 1) - n + r\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right) = 3g - 3 - n,$$

так как

$$\deg\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right) = 0 + (2g - 2) - n > 0 \text{ и } r\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right) = 0.$$

При $n = 2g - 2$ имеем

$\deg\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right) = 0 + 2g - 2 - n = 0$, а значит верно равенство $r\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right) = 0$, когда D не эквивалентно

$D_0 Z$ и $r\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right) = 1$, когда D эквивалентно $D_0 Z$.

Случай $n = (2g - 2)2$ имеется в таблице 3.1 в [4]. Пусть $2g - 2 < n < (2g - 2)2$, тогда имеем равенство

$$i_{\rho,2}(D) = 3g - 3 - n + r\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right).$$

Здесь $\deg\left(\frac{D_0 Z^1}{D}\right) = 0 + 2g - 2 - n < 0$, и если существует f , $(f) \geq \frac{D_0 Z^1}{D}$,

то $0 = \deg(f) \geq \deg \frac{D_0 Z^1}{D}$, $\deg \frac{D_0 Z^1}{D} < 0$ и нет противоречия. Следовательно, в этом случае имеем только: для несущественного характера ρ

$$i_{\rho,2}(D) = 3g - 3 - n + r\left(\frac{Z}{D}\right),$$

а для существенного характера ρ

$$i_{\rho,2}(D) = 3g - 3 - n + r\left(\frac{D_0 Z}{D}\right).$$

Таким образом, доказана теорема о размерности $i_{\rho,2}(D)$, которую сформулируем в виде таблицы 2.

Таблица 2

Для размерности $i_{\rho,2}(D)$

g≥2	deg D = n	Несущественный характер		Существенный характер	
	n>4g-4	0			
	0<n<2g-2	3g-3-n			
	2g-2<n<4g-4	$3g-3-n+r\left(\frac{Z}{D}\right)$		$3g-3-n+r\left(\frac{D_0Z}{D}\right)$	
	n = 2g-2	D~Z	$D \not\sim Z$	D~D0Z	$D \not\sim D_0Z$
		g	g-1	g	g-1
	n = 4g-4	D~Z2	$D \not\sim Z^2$	D~ D0Z2	$D \not\sim D_0Z^2$
1		$r\left(\frac{Z}{D}\right)-g+1$	1	$r\left(\frac{D_0Z}{D}\right)-g+1$	

Рассмотрим общий случай $k \geq 3$. Составим таблицу из $i_{\rho,k}(D)$.

Пусть $n > (2g - 2)k$, тогда имеем $i_{\rho,k}(D) = 0$ при $\deg D = (2g - 2)k + m$, $m = 1, 2, \dots$, так как, если существует $\omega \neq 0$ такое, что $(\omega) \geq D$, то $\deg(\omega) \geq \deg D$ и $(2g - 2)k \geq (2g - 2)k + m$. Противоречие. Следовательно $i_{\rho,k}(D) = 0$ при этих условиях.

Пусть $0 < n < (2g - 2)(k - 1)$, тогда по теореме Римана–Роха для (ρ, k) -дифференциалов получим, что

$$i_{\rho,k}(D) = (2k - 1)(g - 1) - \deg D + r\left((f) \frac{Z^{k-1}}{D}\right) = (2k - 1)(g - 1) - n,$$

так как

$$\deg\left((f) \frac{Z^{k-1}}{D}\right) = 0 + (k - 1)(2g - 2) - n > 0.$$

Пусть $n = \deg D = (2g - 2)(k - 1)$, тогда имеем $\deg\left((f) \frac{Z^{k-1}}{D}\right) = 0 + (2g - 2)(k - 1) - n = 0$. Поэтому вер-

но $r\left(\frac{D_0 Z^{k-1}}{D}\right) = 0$, когда D не эквивалентно $D_0 Z^{k-1}$ и $r\left(\frac{D_0 Z^{k-1}}{D}\right) = 1$, когда D эквивалентно $D_0 Z^{k-1}$.

Случай $n = (2g - 2)k$ рассмотрен в таблице 3.1 в [4].

Пусть $(2g - 2)(k - 1) < n < (2g - 2)k$, тогда имеем равенство

$$i_{\rho,k}(D) = (2k - 1)(g - 1) - n + r\left(\frac{D_0 Z^{k-1}}{D}\right).$$

Здесь $\deg \frac{D_0 Z^{k-1}}{D} = 0 + (k - 1)(2g - 2) - n < 0$, и если существует f , $(f) \geq \frac{D_0 Z^{k-1}}{D}$, то

$$0 = \deg(f) \geq \deg \frac{D_0 Z^{k-1}}{D}, \deg \frac{D_0 Z^{k-1}}{D} < 0$$

и нет противоречия. Следовательно, только получаем: для несущественного характера ρ

$$i_{\rho,k}(D) = (2k-1)(g-1) - n + r \left(\frac{Z^{k-1}}{D} \right),$$

а для существенного характера ρ

$$i_{\rho,k}(D) = (2k-1)(g-1) - n + r \left(\frac{D_0 Z^{k-1}}{D} \right).$$

Таким образом, с учетом предложения 2.1 доказана теорема о размерности $i_{\rho,k}(D)$, которую сформулируем в виде таблицы 3.

Таблица 3

Для размерности $i_{\rho,k}(D)$

g≥2	deg D=n>0	Несущественный характер		Существенный характер	
	n>(2g-2)k	0			
	0<n<(2g-2)(k-1)	(2k-1)(g-1)-n			
	(2g-2)(k-1)<n<(2g-2)k	$(2k-1)(g-1)-n+r\left(\frac{Z^{k-1}}{D}\right)$		$(2k-1)(g-1)-n+r\left(\frac{D_0Z^{k-1}}{D}\right)$	
	n=(2g-2)(k-1)	D~Zk-1	$D \asymp Z^{k-1}$	D~D0Zk-1	$D \asymp D_0Z^{k-1}$
		g	g-1	g	g-1
	n=(2g-2)k	D~Zk	$D \asymp Z^k$	D~D0Zk	$D \asymp D_0Z^k$
		1	$r\left(\frac{Z^{k-1}}{D}\right)-g+1$	1	$r\left(\frac{D_0Z^{k-1}}{D}\right)-g+1$
deg D=-n<0	(2k-1)(g-1)+n				

Таким образом, в данной работе получены размерности $i_{\rho,k}(D)$ для любых дивизоров D , как положительных, так и отрицательных переменных степеней $\deg D$. Отметим, что случаи $n = (2g-2)k, k \geq 0, k \in \mathbb{N}$ найдены были в работе [4].

Замечание 2.1. Размерности получены для фиксированной поверхности F рода $g, g \geq 2$. Используя методы, развитые в [4], и свойства пространства Тейхмюлера можно получить аналогичные результаты для любых переменных характеров ρ на переменной поверхности F_μ .

Замечание 2.2. При $\rho=1$ эти таблицы дают размерности пространств абелевых k -дифференциалов, кратных D , относительно переменной $\deg D$ на компактной римановой поверхности рода $g, g \geq 2$.

Литература

1. Dick, R. Holomorphic differentials on punctures Riemann surfaces / R. Dick // Differential Geometric Methods in Theoretical Physics: Physics and Geometry, Proc. NATO Advanced Research Workshop and XVIII International Conference, Davis, Calif. 1988, 2 – 8 June, N. – Y.: London, 1990.
2. Dick, R. Krichever – Novikov – like Bases on Punctured Riemann Surfaces / R. Dick // Notkestrasse 85, 2 Hamburg 52. Deutsches Elektronen – synchrotron (DESY) 89-059, May 1989.
3. Farkas, H. M. Riemann surfaces / H. M. Farkas, I. Kra // Grad. Text's Math. – New-York: Springer, 1992. – Vol. 71.
4. Чуешев, В. В. Мультипликативные функции и дифференциалы Прима на переменной компактной римановой поверхности. – Ч. 2. / В. В. Чуешев. – Кемерово: КемГУ, 2003.
5. Чуешев, В. В. Геометрическая теория функций на компактной римановой поверхности / В. В. Чуешев. – Кемерово: КемГУ, 2005.

Информация об авторе:

Комарова Марина Владимировна – магистр 2 курса математического факультета, КемГУ, т. 8-908-942-10-89, marishaignat@bk.ru.

Komarova Marina Vladimirovna – Master's Programme student at the Mathematical Faculty of KemSU.

УДК 004.043

**ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ**

Ю. И. Молородов, В. С. Миньков

**INFORMATION COMPUTATIONAL SYSTEM FOR ANALYSING
THE INFLUENCE OF POLLUTION ON BIOLOGICAL OBJECTS**

Y. I. Molorodov, V. S. Minkov

В статье рассматриваются некоторые аспекты создания информационно-вычислительной системы «Биосубстраты Сибири». Система использует интерфейсы, обеспечивающие возможность сбора, хранения и анализа обширного эмпирического материала, собранного специалистами ИХКиГ СО РАН на территории Западной и Восточной Сибири в течение 15 лет. Основой этого материала являются образцы биосубстратов коренных жителей региона: пробы крови и волос, пищевые рационы животных и человека, образцы растений, грибов и пр. Эти материалы дополнены многоэлементным составом атмосферных аэрозолей. Для анализа и выявления негативного влияния загрязнений от крупных промышленных центров Сибири реализованы математические алгоритмы выявления корреляционных связей между многоэлементным составом атмосферных аэрозолей и различными группами биосубстратов.

Some aspects of the data-processing system “Siberia biosubstrates” are considered. The system uses an interface that provides an opportunity to collect, store and analyze the vast amount of empirical material collected in Western and Eastern Siberia during 15 years. The core of this material are examples of the region's natives' biosubstrates: blood and hair samples, animal and human food rations, samples of plants, fungi, etc. These materials are complemented by multi-element composition of atmospheric aerosols. Mathematical algorithms of identifying correlations between the multielement composition of atmospheric aerosols and various groups biosubstrates are implemented to analyze and identify the negative impact of pollution from major industrial centers in Siberia.

Ключевые слова: веб-ориентированная обработка данных, анализ данных, семантическая модель, экология.

Keywords: Web-based data processing, data analysis, semantic model, the environment.

Введение

Информационные технологии оказывают огромное влияние на все области человеческой деятельности, связанные с накоплением и обработкой информации. За относительно небольшое время существования информационно-коммуникационных технологий накоплен огромный объем разнообразных данных, представленных исключительно в электронной форме. Возникают задачи обеспечения доступа (в том числе и удаленного) пользователей к разнородным типам и форматам данных, обработки и интерпретации результатов наблюдений за состоянием атмосферы промышленного центра Западной Сибири.

Интеграция информационных ресурсов в единую информационную среду и организация доступа к вычислительным ресурсам – это одни из важнейших направлений развития современных информационных технологий. Решение проблем создания и интеграции информационных ресурсов и продуктов должно стать необходимым условием развития многих стран, в том числе и России. Стремительное развитие глобальных информационных и вычислительных сетей ведет к изменению фундаментальных парадигм обработки данных, которое можно охарактеризовать как переход к поддержке и развитию распределенных информационно-вычислительных ресурсов [2, с. 161 – 165]. Технологии использования распределенных информационно-вычислительных ресурсов получают все больший приоритет в информационном обществе. При этом наблюдаются переход к исключительно распределенной схеме создания, поддержания, хранения ресурсов и стремление к виртуальному единству посредством предоставления свободного доступа к любым ресурсам сети через ограниченное число точек доступа. Постулируется принцип формирования в ресурсах сети единого, математически однородного поля компьютерной информации, которое способно стать универсальным и машинезависимым носителем данных, унифицированных программ и глобально распределенных вычислительных процессов [3].

Предметная область

Атмосфера крупных городов подвержена интенсивному загрязнению продуктами жизнедеятельности человека. Это как выбросы в атмосферу предприятий, находящихся вблизи городов, так и загрязнение со стороны автомобильного транспорта. Уровень качественного и количественного содержания органических веществ в аэрозолях воздуха является важным критерием для оценки загрязнения атмосферы и окружающей среды. Для этого на территории г. Новосибирска службами Гидрометеоцентра созданы посты наблюдения за состоянием атмосферы. На них производятся, в соответствии с рекомендациями ВОЗ, измерения в воздухе атмосферы содержания пыли, сажи, диоксида серы SO_2 , озона, оксида углерода CO , диоксида азота NO_2 , оксида азота NO , сероводорода H_2S , фенола CH , фтористого водорода HF , аммиака NH_3 , формальдегида CH_2O и др. Объемы данных, полученных на постах наблюдений, значительны по объемам и разнообразию. Это обстоятельство делает необходимым и актуальным использование распределенных информационно-вычислительных систем для задач, связанных с наблюдением за состоянием атмосферы. Использование электронных версий обеспечивает пользователю оперативный доступ к результатам наблюдений, хранение и математическую обработку.

Такую задачу решает специализированная проблемно-ориентированная Информационная Система, которая позволяет решить проблему хранения этого эмпирического материала, его обработку с помощью современных математических алгоритмов. Это позволит перевести работу с этими данными на качественно более высокий уровень, открывающий перспективы для постановки и эффективного решения новых научных и практических задач.

Модель данных

Анализ данных наблюдений за состоянием атмосферы позволяет сделать следующие выводы.

Исходные данные наблюдений представляют собой временные ряды скалярных вещественнозначных функций, представленных в виде пар $\langle D, V \rangle$, где D — дата и время проведения замера, V — результат измерения.

Каждому из рядов соответствует набор метаданных, адекватно описывающих временные ряды результатов измерений характеристик атмосферы:

- пост наблюдений, на котором производились измерения;
- параметрами этого свойства являются координаты поста наблюдений и его тип (например, пост наблюдений за загрязнением атмосферы, метеостанция);
- объект измерения. Единственным параметром этого свойства является его название. Например, атмосферный воздух и т. п.;
- измерявшаяся характеристика объекта измерений. Это свойство обладает двумя параметрами: название измерявшейся характеристики (например, концентрация того или иного атмосферного аэрозоля) и ее размерность (например, мг/м^3);
- инструмент (прибор), с помощью которого производились измерения;
- единственной характеристикой этого свойства является название прибора;
- метод предварительной обработки данных (например, почасовое усреднение). Единственной характеристикой этого свойства является название метода.

Логическая структура данных представлена в виде логической модели на рис. 1.

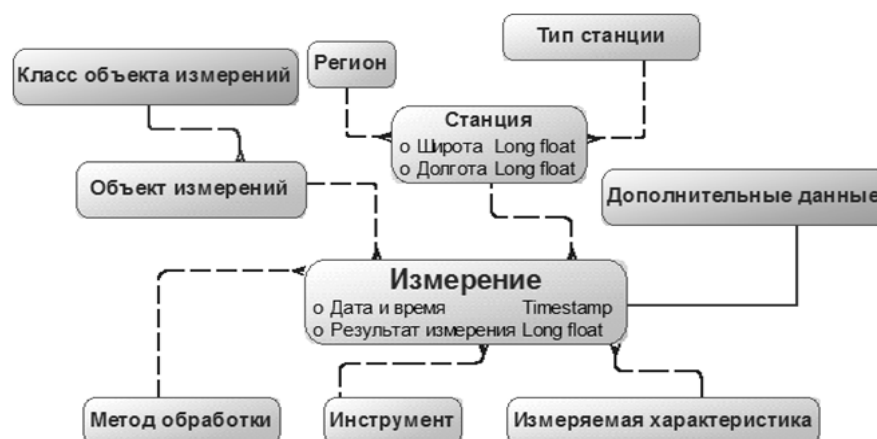


Рис. 1. Структура логической модели данных

Реализация логической модели данных

Каждому из типов метаданных создается отдельная таблица реляционной СУБД со следующей структурой:

$\langle MPK_k, DESCR_k, C_k^1, \dots, C_k^j, \dots \rangle$, где MPK_k – первичные ключи, C_k^j – значения специфичных для каждого типа метаданных характеристик, $DESCR_k$ – необязательное текстовое описание.

Данные измерений хранятся в отдельной таблице, в виде единичных значений, с каждым из которых ассоциирован набор метаданных ряда и отметка о времени замера значения. Этой таблице соответствует следующая структура:

$\langle PK, D, V, MPK_j, \dots, MPK_k \rangle$, где D – дата и время проведения замера, V – результат измерения, PK – первичный ключ, MPK_j – значения первичных ключей для записей таблиц, соответствующих базовому набору метаданных и задающих связь типа многие-к-одному между результатами измерений и метаданными.

Для задания связей между записями в таблице результатов измерений и дополнительными метаданными, а также для иерархической организации метаданных используются таблицы со структурой вида $\langle MPK_k, TPk_k \rangle$, где MPK_j – значение первичного ключа из одной из таблиц, хранящей дополнительные метаданные, TPk_j – значение первичного ключа из таблицы, хранящей целевые записи, с которыми должна быть связана запись из таблицы метаданных.

Были введены служебные метаданные “регион” и “предметная область”, относящиеся к постам наблюдения и измерениям, соответственно. Свойство “регион” предназначено для задания параметров ассоциированной с постом наблюдения карты, “предметная область” – для задания предметной области, к которой имеет отношение тот или иной временной ряд.

Алгоритмы обработки временных рядов данных

Дадим несколько определений основных понятий, которые будут нам необходимы для понимания дальнейших рассуждений.

Пусть X – объект измерения, имеющий некоторое количество признаков A_x (наперед неизвестное), а T – упорядоченное множество моментов времени, в который производились измерения. В каждый момент времени $t \in T$ в результате замера обнаруживается некоторое множество признаков $A_x[t]$ и для каждого $\alpha \in A_x[t]$ известно его значение $\psi_\alpha^t \in \mathbb{R}$.

Определение 1. Замером объекта X в момент времени t будем называть множество пар признак–значение:

$$X_t = \{(\alpha, \psi_\alpha^t) \mid \alpha \in A_x(t)\}.$$

Определение 2. Наблюдением объекта T в течение времени T будем называть множество χ , состоящее из замеров объекта X , произведенных в моменты времени T :

$$\chi_T = \{X_t \mid t \in T\}.$$

Определение 3. Признаками, обнаруженными в ходе наблюдений в моменты T , будем называть множество

$$A_x[T] = \bigcup_{t \in T} A_x[t].$$

Далее нам понадобится функция $\gamma(x, t)$, определенная следующим образом:

$$\gamma(x, t) = \begin{cases} \psi_x^t, & \text{если значение признака } x \text{ было выявлено в момент } t, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Определение 4. Таким образом, обобщенным значением признака α в момент t , будем называть величину $\hat{\psi}_\alpha^t = \gamma(\alpha, t)$.

Наиболее удобным представлением замера объекта X за период T является так называемая матрица объект–признак.

Определение 5. Матрицей объект–признак наблюдения объекта X за период T называется $(M \times N)$ – матрица, составленная из обобщенных значений признаков, обнаруженных в моменты $t \in T$:

$$\Omega_{\chi}^T = \begin{pmatrix} \hat{\psi}_{\alpha_1}^{t_1} & \hat{\psi}_{\alpha_2}^{t_1} & \dots & \hat{\psi}_{\alpha_N}^{t_1} \\ \hat{\psi}_{\alpha_1}^{t_2} & \hat{\psi}_{\alpha_2}^{t_2} & \dots & \hat{\psi}_{\alpha_N}^{t_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\psi}_{\alpha_1}^{t_M} & \hat{\psi}_{\alpha_2}^{t_M} & \dots & \hat{\psi}_{\alpha_N}^{t_M} \end{pmatrix}, M = |T|, N = |A_{\chi}|T|.$$

Матрицы объект–признак нашли широкое применение [7, с. 56].

Регрессионный анализ

Линейный регрессионный анализ – статистический метод исследования зависимости между зависимой переменной Y и одной или несколькими независимыми переменными $X_1, X_2, \dots, X_p$. Чаще всего используется для:

1. определения степени детерминированности вариации критериальной (зависимой) переменной предикторами (независимыми переменными);
2. предсказания значения зависимой переменной с помощью независимой (-ых);
3. определения вклада отдельных независимых переменных в вариацию зависимой.

На практике линия регрессии чаще всего ищется в виде линейной функции (линейной регрессии)

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_N \cdot X_N \quad Y,$$

наилучшим образом приближающей искомую кривую. Это можно сделать методом наименьших квадратов, когда минимизируется сумма квадратов отклонений реально наблюдаемых Y от их оценок:

$$\sum_{k=1}^M (Y_k - \hat{Y}_k)^2 \rightarrow \min \sum_{k=1}^M (Y_k - \hat{Y}_k)^2$$

(M – объём выборки).

Для решения задачи регрессионного анализа методом наименьших квадратов вводится понятие «функции невязки»: $\sigma(\bar{b}) = 0.5 \sum_{k=1}^M (Y_k - \hat{Y}_k)^2$.

Условие минимума функции невязки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma(\bar{b})}{db_i} = 0 \\ i = 0 \dots N \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^M M y_i = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_j x_{i,j} + b_0 M \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,k} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_j x_{i,j} x_{i,k} + M b_0 \sum_{i=1}^M x_{i,k} \end{array} \right. \quad k = 1 \dots N.$$

Полученная система является системой $N + 1$ линейных уравнений с $N + 1$ неизвестными $b_0 \dots b_N$. Если представить свободные члены левой части уравнений матрицей:

$$B = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^M y_i \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,1} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^M y_i x_{i,N} \end{pmatrix},$$

а коэффициенты при неизвестных в правой части матрицей:

$$A = \begin{pmatrix} M & \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,1} x_{i,1} & \sum_{i=1}^M x_{i,2} x_{i,1} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N} x_{i,1} \\ \sum_{i=1}^M x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,1} x_{i,2} & \sum_{i=1}^M x_{i,2} x_{i,2} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N} x_{i,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^M x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,1} x_{i,N} & \sum_{i=1}^M x_{i,2} x_{i,N} & \dots & \sum_{i=1}^M x_{i,N} x_{i,N} \end{pmatrix},$$

то получаем матричное уравнение: $A\bar{x} = \bar{b}$, которое легко решается методом Гаусса. Полученная матрица будет матрицей, содержащей коэффициенты уравнения линии регрессии:

$$X = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_N \end{pmatrix}.$$

Выбор методов статистического анализа

Важными понятиями многомерного статистического анализа являются понятия пространства, его размерности и взаимного расположения объектов в этом пространстве, а также расстояния или сходства между его объектами. На них основаны многие статистические методы: факторный анализ и его разновидности: метод наибольшего правдоподобия, метод главных компонент и элементы кластерного анализа (как правило, в виде деревьев). В биологических и экологических исследованиях они часто применяются, поскольку результаты обработки хорошо поддаются содержательной интерпретации.

В своей работе мы использовали алгоритмы кластерного анализа из библиотеки SciPy [8, 9] для языка программирования Python. В нее входят модули для оптимизации, интегрирования, специальных функций, обработки сигналов, обработки изображений, генетических алгоритмов и др.

Задачей кластерного анализа является разбиение исходного множества объектов на непересекающиеся подмножества схожих объектов, называемые кластерами, так, чтобы каждый кластер состоял из схожих объектов, а объекты разных кластеров существенно отличались. Здесь активно используется понятие близости между объектами. Иногда основные принципы кластерного анализа могут слегка нарушаться. Например, в таких алгоритмах, как метод k -средних или метод Уорда (иерархическая кластеризация), центр кластера вычисляется как среднее координат входящих в него объектов. При этом неявно предполагается, во-первых, что усреднение не выводит центр за пределы кластера, и он тоже может считаться равноправным с другими объектом, и, во-вторых, что такой центр в некотором смысле минимизирует максимальное расстояние от себя до объектов кластера и поэтому может считаться наилучшим представителем всего кластера. Алгоритм иерархической кластеризации строит иерархию групп, объединяя на каждом шаге две самые похожие группы. Сначала каждая группа состоит из одного элемента. На каждой итерации вычисляются попарные расстояния между группами, и группы, оказавшиеся самыми близкими, объединяются в новую группу. Так повторяется до тех пор, пока не останется всего одна группа.

Можно выделить следующие этапы кластеризации:

- разбиение выборки на группы схожих объектов (это позволяет упростить дальнейшую обработку данных, применяя к каждому кластеру свой метод анализа);
- сжатие данных. Если исходная выборка избыточно большая, то можно сократить ее, оставив по одному наиболее типичному представителю от каждого кластера;
- обнаружение новизны (выделяются нетипичные объекты, которые не удастся присоединить ни к одному из кластеров).

При работе алгоритма можно выделить следующий набор действий [8].

1. Инициализация двух матриц C и G матрицей Ω ;
2. Пока не пусто:

- выбор двух элементов $c_1, c_2 \in C$, расстояние между которыми минимально,
- добавляем в G вершину c_{12} , являющуюся центрами масс c_1 и c_2 и соединяем их между собой,
- $C := C \cup \{c_{12}\} \setminus \{c_1, c_2\}$;

3. Получаем структуру G .

Результатом работы алгоритма является древообразная иерархическая структура (дендрограмма), из которой можно выбрать кластеризацию с требуемой степенью детализации (отсечь на том или ином максимальном расстоянии).

Для оценки корреляций между элементами многоэлементного состава каждого из объектов был применен кластерный анализ с корреляционной метрикой, причем объем исходных выборок был увеличен методом разномасштабного повторного отбора MBR – Multiscale Bootstrap Resampling. Этот метод позволяет оценить степень устойчивости полученных кластеров к увеличению объема экспериментальных данных.

Методика анализа взаимосвязей многоэлементных составов

Для исследования взаимосвязей многоэлементных составов были применены аппараты регрессионного и корреляционного анализов. Ввиду того, что значения концентраций элементов в субстратах различаются в пределах нескольких порядков, то при графическом сопоставлении их удобнее выражать в логарифмической форме. Каждому наблюдению $\mathcal{X}$ объекта X сопоставлялось множество:

$$\bar{\chi} = \left\{ \varphi_{\alpha}^{\chi} = \frac{\sum_{t \in T_X[\alpha]} \ln \psi_{\alpha}^t}{|T_X[\alpha]|} \mid \alpha \in A_X[T_X] \right\}.$$

А каждой паре исследуемых объектов $\mathcal{X}$ и $\mathcal{Y}$ сопоставлялось множество

$$M = \left\{ (\varphi_\alpha^x, \varphi_\alpha^y) \mid \varphi_\alpha^x \in \bar{X}, \varphi_\alpha^y \in \bar{Y}, \right. \\ \left. \alpha \in A_X[T_X \cap T_Y] \cap A_Y[T_X \cap T_Y] \right\},$$

которое далее подавалось на вход алгоритму линейной регрессии. В результате работы которого получаются являются линейные зависимости вида $\bar{y} = a\bar{x} + b$, характеризующую линейную взаимосвязь логарифмов среднего геометрического концентраций элементов, входящих в каждый из объектов измерения.

Фактически, получаемая зависимость отражает степенную зависимость между средними геометрическими тех же элементов, т. е. $y = b'x^\alpha$, $b' = e^b$.

Расчет степени близости линейно взаимосвязи объектов $\mathcal{X}$ и $\mathcal{Y}$ – r рассчитывался как коэффициент линейной корреляции Пирсона для выборок $\mathcal{X}$ и $\mathcal{Y}$.

Результаты обработки данных наблюдений

Исходными данными для данного исследования послужили результаты измерения концентраций многоэлементного состава следующих биосубстратов и геохимических сред:

- кровь, образцы волос мужского и женского населения г. Тарко–Сале, п. Самбург и п. Красноселькуп за период 2000 – 2001 гг.;
- рацион, образцы печени, мышечной и костной ткани бурозубки и рыжей полевки обитающих на территории Среднего Урала за период 2000 – 2001 гг.; (г. Екатеринбург);
- образцы плаценты жительниц г. Новосибирска за период 2007 г.;
- образцы воды р. Канчалан за период 2007 г.

На рис. 2 и 3 представлена взаимосвязь многоэлементного состава и биосубстрата в виде линейной регрессии, показывающая связь элементного состава атмосферных аэрозолей ткани живого организма (плацента) и растительности (солодка), взятые в г. Новосибирск в 2007 г. с 95 % доверительным интервалом. Для всех зависимостей наблюдаются высокие показатели коэффициентов корреляции (0.75 – 0.99, и значения стандартной ошибки для коэффициентов линейной регрессии и коэффициента корреляции, полученные методом повторного выбора (метод складного ножа (bootstrap resampling)). Эти результаты убедительно показывают устойчивую линейную связь логарифма концентрации многоэлементного состава АА и исследуемых образцов.

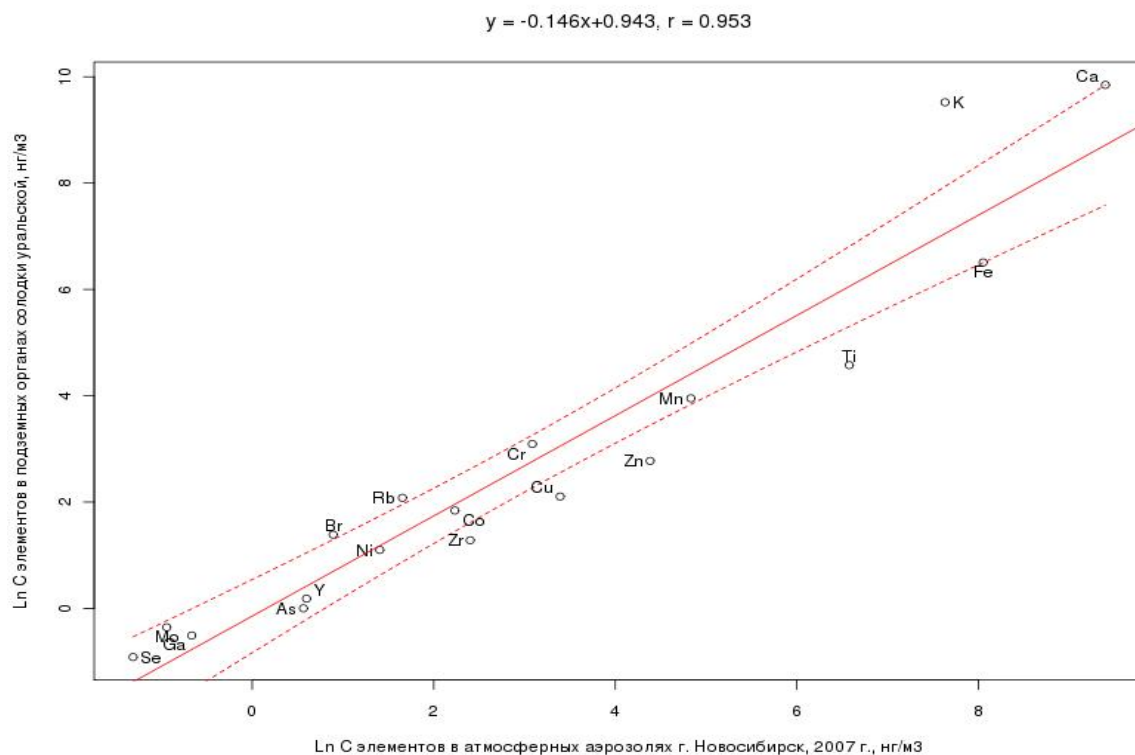


Рис. 2. Аэрозоль атмосферы и солодки

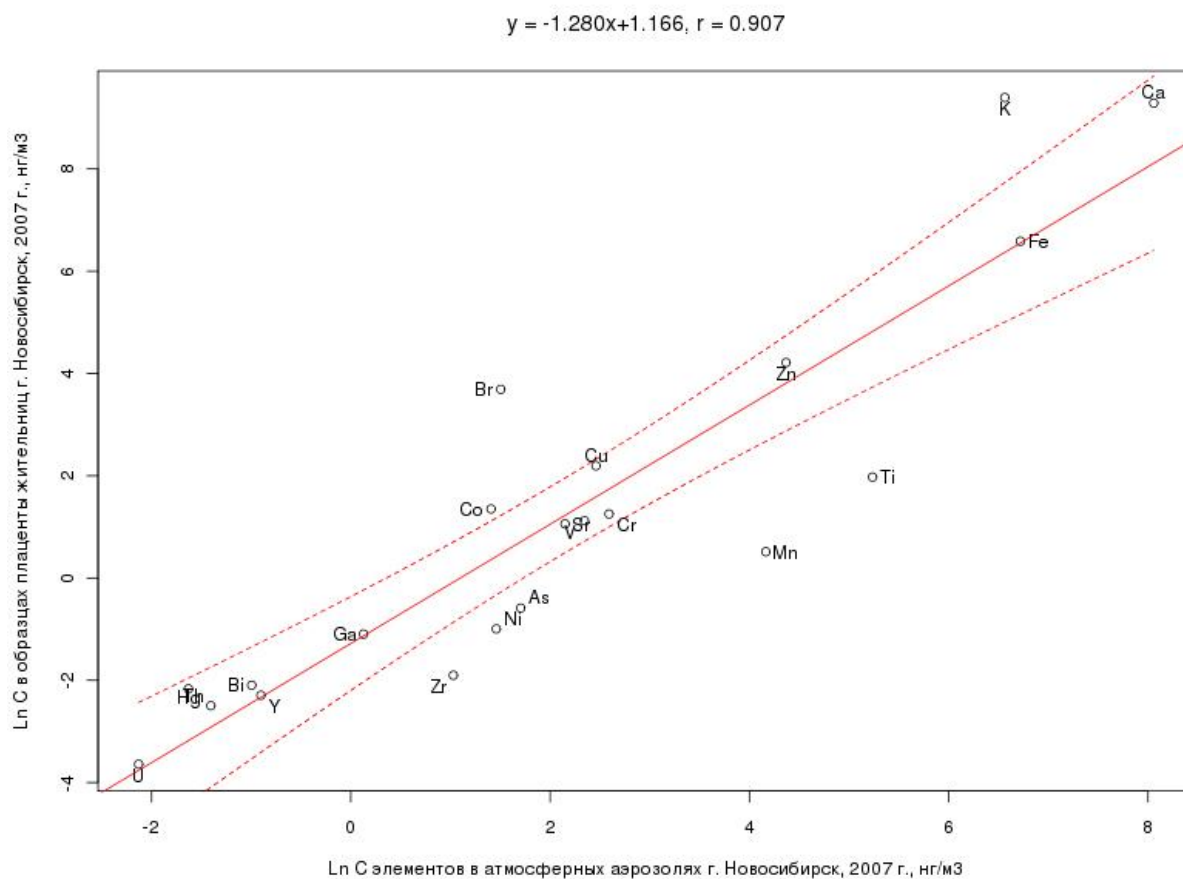


Рис. 3. Аэрозоль атмосферы и ткани плаценты

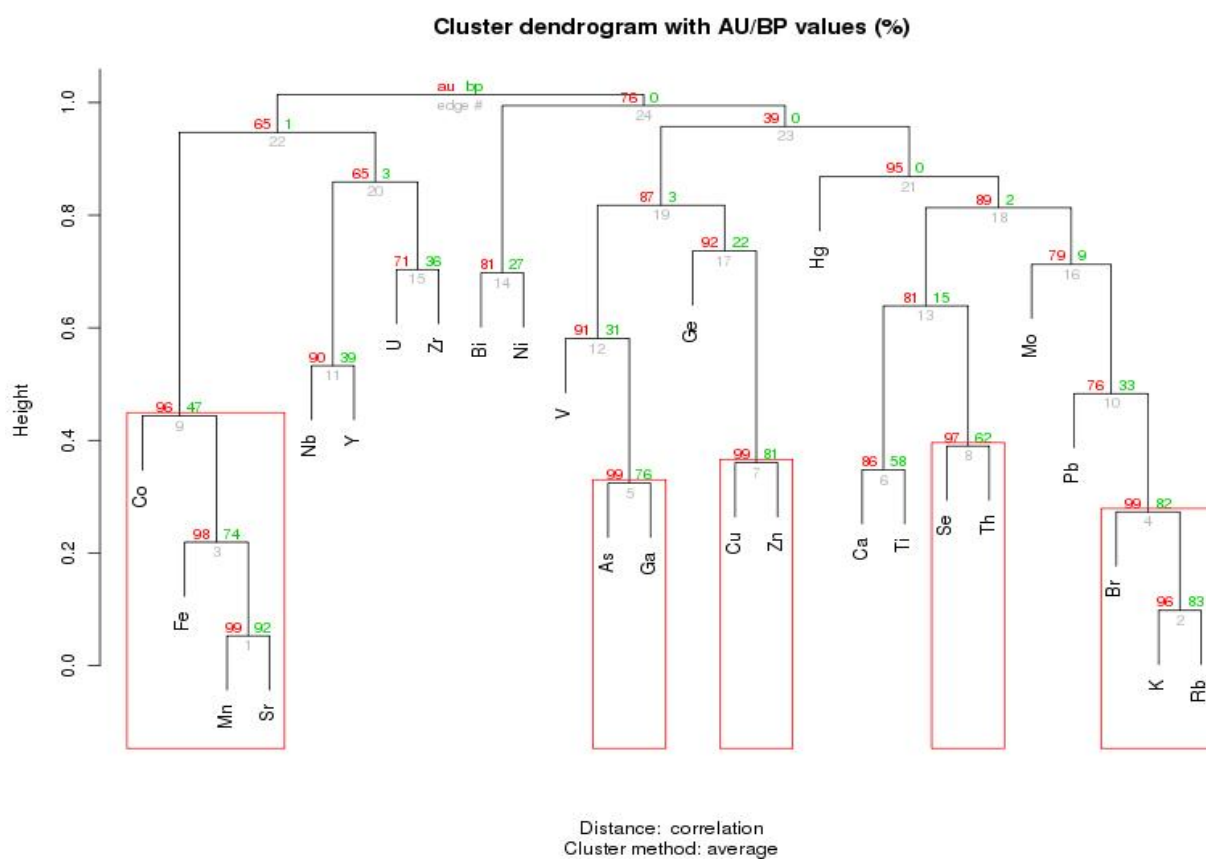


Рис. 4. Элементный состав волос

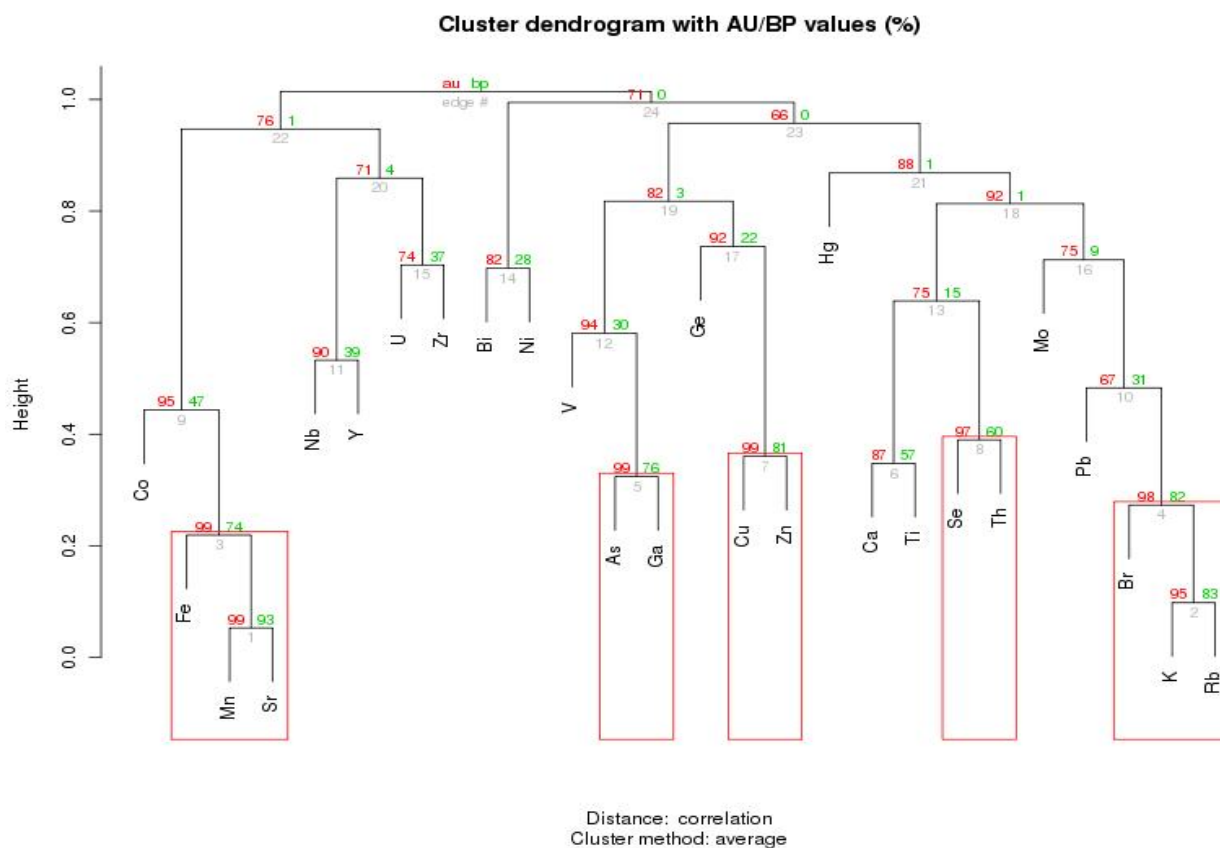


Рис. 5. Элементный состав крови

На рис. 4 и 5 представлены корреляционные зависимости концентраций элементного состава аэрозолей в виде дендрограммы (крови и волос, взятые у человека в п. Самбург в 2001 г. Кластерный анализ, выявил схожесть устойчивых структур элементов для взаимосвязей между хорошо коррелирующими объектами. Дендрограмма - Approximately Unbiased (AU) и Bootstrap Probability (BP) аппроксимируют уровень значимости для кластера. AU=98 обозначает, что гипотеза разрушения кластера при добавлении новых наблюдений будет отвергнута с уровнем значимости 0.02. Цветом выделены кластеры, у которых AU ≥ 95. Они наиболее устойчивы к возможному увеличению количества наблюдений.

Заключение

Предложена модульная архитектура для построения веб-сайтов. На ее основе созданы модули информационно-вычислительной системы, предназначенные для хранения и обработки результатов мониторинга атмосферы промышленного центра Западной Сибири. Разработана расширяемая модель данных, предназначенная для хранения скалярных временных рядов. Эта модель может использоваться и в аналогичных компонентах систем, предназначенных для хранения и обработки временных рядов данных. На основе предложенной архитектуры создана расширяемая подсистема импорта данных наблюдений за состоянием атмосферы.

Создан модуль, позволяющий формировать отчеты по хранимым данным за произвольный период. Предоставлены результаты математической обработки хранимых данных, и создания других компонентов системы. В качестве демонстрации возможностей API обработки реализованы модули построения графиков и экспорта отчетов в XML.

Установлено, что элементный состав указанных тканей организма как человека, так и животных довольно тесно связан друг с другом. Учитывая полученные данные, можно сделать вывод, что, по-видимому, любая ткань организма человека или животных может использоваться как информативный тест для оценки природной или техногенной нагрузки. Результаты обработки данных наблюдений убедительно показывают взаимосвязь биосубстратов и элементного состава атмосферных аэрозолей (АА). АА являются, по-видимому, главным источником микроэлементов, которые поступают в пищевую цепь и в кровь человека и животных, а затем и в другие ткани организма.

Работа финансировалась Президентской программой НШ 931.2008.9, РФФИ (грант № 09-07-00277), и Интеграционным проектом СО РАН № 50.

Литература

1. Torrence, G. A practical guide to wavelet analysis / G. Torrence, G. P. Compo // Bull. Amer. Meteorol. Soc. – 1998. – Vol. 79. – №. 1.
2. Технология создания распределенных информационно-вычислительных ресурсов СО РАН / О. Л. Жижимов, А. М. Федотов, Л. Б. Чубаров, Ю. И. Шокин // Тр. Первой Межд. конф. САИТ-2005. 12 – 16 сент. 2005 г., Переславль-Залесский. – Т. 2.: Системный анализ и информационные технологии. – М., 2005.
3. The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure Ed. by I. Foster, C. Kesselman. Morgan Kaufmann Pub. – San Francisco, CA. 1999.
4. Распределенная информационно-вычислительная среда для исследования экологических систем / А. М. Федотов, В. Б. Барахнин, А. Е. Гуськов, Ю. И. Милородов // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – Ч. I.
5. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека. Копенгаген: Региональные публикации ВОЗ // Европейская серия. – 2001. – № 5.
6. ГОСТ 17.2.1.03-84. Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения.
7. Ефимов, В. М. Многомерный анализ биологических данных / В. М. Ефимов, В. Ю. Ковалева. – СПб, 2008.
8. Matlab vs. Python and NumPy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lbolla.info/blog/2007/04/11/numerical-computing-matlab-vs-pythonnumpyweave/>.
9. Performance Python – NumPy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://scipy.org/PerformancePython>.

Информация об авторах:

Молородов Юрий Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программирования и кафедры дискретной математики и информатики, НГУ, т. 8(383) 334-91-22, yumo@ict.nsc.ru.

Molodov Yuriy Ivanovich – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Programming and the Department of Discrete Mathematics and Informatics of the Faculty of Mechanics and Mathematics of Novosibirsk State University.

Миньков Всеволод Сергеевич – аспирант ИВТ СО РАН, т. 8(383) 334-91-22, yumo@ict.nsc.ru.

Minkov Vsevolod Sergeevich – post-graduate student at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 627.51:551.515.9

ЭКСПЕРТНАЯ ГИС ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПАВОДКООПАСНЫХ СИТУАЦИЯХ ДЛЯ ТЕРРИТОРИЙ СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Л. Ф. Ноженкова, В. В. Ничепорчук

EXPERT GIS FOR DECISION-MAKING SUPPORT IN FLOODS FOR THE SIBERIAN REGION

L. F. Nozhenkova, V. V. Nicheporchuk

Представлена Экспертная геоинформационная система "Паводки", предназначенная для анализа данных мониторинга паводковой обстановки на территории Сибири, а также информационной поддержки принятия решений по проведению предупредительных и аварийно-спасательных мероприятий в ЧС, связанных с затоплением территорий.

The expert geoinformation system "Flood" is described. The system keeps the functions of analyzing the monitoring data of flood circumstances in Siberia and providing decision-making informational support for preventive and rescue actions in emergencies (flooding).

Ключевые слова: затопление территорий, Сибирский регион, интеграция технологий, средства анализа данных, геоинформационные системы, базы знаний.

Keywords: flooding, Siberian region, integration of technologies, data analysis tools, geoinformation systems, knowledge bases.

Введение

Сибирский регион, обладая обширной территорией, расположенных в различных климатических зонах, развитой сетью водных объектов, большим количеством гидротехнических сооружений (ГТС), подвержен широкому спектру природных чрезвычайных ситуаций (ЧС). Наиболее характерными из них являются весенне-летние паводки, аварии на малых ГТС, вызывающие затопления территорий, объектов и инфраструктуры [3].

Большое количество населенных пунктов Сибири, объектов, транспортных коммуникаций находятся в долинах рек, поэтому опасность наводнений находится на высоком уровне. Ежегодный ущерб от затоплений территорий только для Красноярского края составляет более 50 млн. руб. Смягчить последствия стихии, предотвратить значительные ущербы может комплексный подход к проведению предупредительных и оперативных противопаводковых мероприятий.

Управление территориальной безопасностью должно быть обеспечено комплексной информационной поддержкой. В повседневном режиме функционирования это данные мониторинга гидрологической, метеорологической и ледовой обстановки и прогнозы характера прохождения паводков различной срочности, зонирования территории по степени риска ЧС, сценарии затоплений территории различной обеспеченности. На основании этой информации планируются превентивные мероприятия, определяется их приоритетность, объем и стоимость, проводится перегруппировка сил и средств, подготовка материальных, финансовых и других резервов [7]. В режиме ЧС формируются оперативные данные о динамике и последствиях затопления территорий, варианты минимизации потерь и ущербов.

Существующие в настоящее время автоматизированные информационные системы предназначены для решения отдельных задач управления. Это анализ данных мониторинга, сбор данных об инфраструктуре территорий, моделирование зон затопления. Например, комплекс программ, созданных в Датском метеорологическом институте, позволяет оценить последствия прорывов плотин дамб, параметры затопления и нанести на карты районы стихийного бедствия [1]. Однако они адаптированы для рек Европы с небольшими расходами воды в створах, интенсивным хозяйственным использованием и требуют большого количества исходных данных, что проблематично для малоизученных рек Сибири. Подобные системы разработаны и в Американском институте исследований окружающей среды (ESRI), как дополнительные модули к широко известной программе ArcGIS [2, с. 288 – 292]. Широкую известность получила система CHECK-RAS моделирования затопления территорий, расчета высоты волны прорыва и зон затопления при авариях на гидротехнических сооружениях. Система выполняет также расчет масштабов эрозии почв, возникающей вследствие ливневых паводков, а также оценку рисков затоплений прибрежных территорий, вызванных ветровыми нагонами. Программа может быть использована в качестве расчетного модуля при формировании решений по ликвидации ЧС, однако требует специализированной подготовки в области гидрологии [3].

В России по заказу МЧС ряд организаций (Центр исследования экстремальных ситуаций, Академия им. В. Куйбышева и другие) разработали ряд программ, моделирующих ситуации, связанные с затоплениями территорий [11].

Фрагментарное решение задач поддержки принятия решений, отсутствие упорядоченных информационных ресурсов и достаточной методической базы снижает эффективность управления безопасностью.

Для эффективного предотвращения ЧС, связанных с затоплениями территорий, смягчения последствий наводнений необходимо дальнейшее развитие региональной системы мониторинга и прогнозирования, создание единого информационного пространства для межведомственного обмена данными мониторинга и прогноза обстановки [5, с. 46 – 54]. Эти задачи определены нормативными документами [8, 10]. Перечислим основные из них:

1. формирование банков данных об источниках ЧС, создание специализированных геоинформационных систем, ведение и актуализация баз данных о ЧС;
2. сбор, обработка и анализ информации об источниках ЧС и показателях риска возникновения ЧС;
3. оценка последствий ЧС, формирование рекомендаций по управлению рисками ЧС и реализации комплекса мер, направленных на предупреждение ЧС и снижение негативных последствий при их возникновении;
4. разработка типовых сценариев возникновения и развития ЧС и оценка риска их возникновения.

Экспертная геоинформационная система "Паводки" может служить прототипом единой автоматизированной системы анализа данных комплексного мониторинга ЧС и оперативного контроля обстановки. В статье описаны: состав системы, принципы ее построения, примеры решения задач в различных режимах функционирования.

Использование информационных ресурсов для оценки опасностей и управления в ЧС

Информационная среда системы «Паводки» содержит: разнообразные базы данных, пространственную информацию, банк сценариев ЧС, реализованный в виде базы знаний. Таблицы базы данных сгруппированы по 5 классам: справочники, источники и реципиенты риска, сети и данные мониторинга обстановки, силы и средства предупреждения и ликвидации ЧС (таблица 1). Большинство объектов баз данных имеет картографическую привязку (координаты или единый идентификатор объекта). Это позволяет строить карты с произвольным набором тематических слоев и оперативным доступом к атрибутивной информации по каждому пространственному объекту.

Таблица 1

Основные сущности базы данных системы «Паводки»

№	Наименование таблиц	Функциональные задачи, в которых используются информационные ресурсы
Справочники		
1	Территориальный справочник населенных пунктов (ОКАТО)	Территориальная привязка объектов и событий
2	Гидрологический справочник (водоемы и водотоки)	
3	Классификатор чрезвычайных ситуаций МЧС РФ	Формализация данных мониторинга для построения аналитических моделей
Источники риска		
1.1	Гидротехнические сооружения	Мониторинг состояния ГТС, оценка возможных последствий аварийных ситуаций, подготовка предложений по мероприятиям на объектах
1.2	Заторо- и зажооропасные участки	Оценка вероятностей ЧС при мониторинг движения кромки ледостава, формирование сценариев затопления территорий
1.3	Ледовые переправы	
Характеристика территорий		
2.1	Населенные пункты	Оценка последствий возможных ЧС (уязвимости территорий), формирование рекомендаций по действиям в условиях ЧС
2.2	Автодороги, мосты	
	Объекты жизнеобеспечения населения (водо- и теплоснабжения)	
Мониторинг обстановки		
3.1	Метеорологическая обстановка	Визуализация динамики изменения обстановки, отслеживание резких изменений контролируемых параметров
3.2	Гидрологическая обстановка	
3.3	Режимы работы ГЭС	
3.4	Мониторинг толщины льда	Оценка вероятности возникновения заторов при вскрытии рек и подвижек льда в зимний период
3.5	Архив наводнений и высоких уровней воды	Поиск прецедентов, года-аналога при долгосрочном прогнозировании ЧС на всех территории субъекта РФ
Силы и средства предупреждения и ликвидации ЧС		
4.1	Данные по аварийно-спасательным формированиям	Формирование рекомендаций по действиям в условиях ЧС, списков оповещения должностных лиц, оценка возможностей спасформирований
4.2	Телефонные справочники	
4.3	Планы эвакуации населения, животных, материальных ценностей	
4.4	Предупредительные мероприятия	Оценка степени защищенности территорий, приоритетности выполнения мероприятий, формирования рекомендаций по ликвидации последствий затопления территорий
4.5	Материально-технические и финансовые резервы	
4.6	Пункты временного размещения пострадавших	

Информация, представленная в базах данных, имеет различный регламент актуализации, установленный нормативными документами МЧС РФ. Данные по территориям и характеристики подразделений корректируются один раз в год перед наступлением весенних паводков, данные мониторинга обстановки – ежедневно, информация о ЧС заносится немедленно при поступлении. Всего в системе представлено более 100 таблиц, использующихся для решения функциональных задач в различных режимах функционирования.

Система использует также большое количество картографических ресурсов. Для отображения гидрологических процессов на территории субъектов используются карты М1:1 000 000. Карты двухкилометрового масштаба используются для моделирования обстановки в отдельном муниципальном районе либо на

каком-либо участке реки. Цифровые планы населенных пунктов М1:10 000 служат для детальной оценки последствий возможных затоплений территорий и моделирования ЧС локального масштаба. В результате моделирования зон затопления населенных пунктов с соответствующим информационным наполнением возможно проведение оценок количества пострадавшего населения, прямого ущерба от повреждения инфраструктуры и косвенного ущерба от нарушения жизнедеятельности. Для моделирования зон затопления используются цифровые модели рельефа. Они представляют собой попиксельные матрицы поверхности с точностью 1 – 3 метра, разработанные на основе данных спутникового зондирования SRTM.

Используя комбинированные цифровые карты различных масштабов с цифровыми моделями рельефа, можно смоделировать контуры зоны затопления, а в результате серии картографических запросов сформировать список объектов, попадающих в зону затопления. Новизна данной модели состоит в том, что помимо горизонтального поднятия уровня воды (заполнение водохранилищ), она учитывает прохождение волны паводка с учетом уклона реки. Это позволяет получать адекватную картину затопления для больших территорий при прохождении волны половодья, строить различные карты рисков ЧС, оперативной обстановки, использовать фрагменты карт для формирования отчетных документов.

Базы знаний экспертной системы описывают ситуацию в виде фреймов, представляющих собой набор слотов и процедур их обработки. В момент чрезвычайной ситуации она формирует необходимые решения по управлению в ЧС, обращаясь к другим модулям системы. Необходимая информация о месте ЧС и характеристиках формирований извлекается из баз данных, последствия ЧС моделируются в ГИС и с помощью расчетных методик, рекомендации по действиям в ЧС формируются на основе баз знаний. Недостающая информация может запрашиваться у пользователя, который инициирует процесс вывода. Вывод представляет собой эстафету присоединенных процедур, которые автоматически вызывают необходимые модули системы.

Разработан редактор баз знаний, позволяющий создавать модели ситуаций непосредственно из оболочки программы. Для актуализации и пополнения баз данных разработана технология распределенного сбора данных, импорта данных в хранилище в автоматическом и ручном режимах.

Работа системы в различных режимах функционирования показана на рисунке 1.

Экспертная геоинформационная система «Паводки»

Режим работы	Зонирование территорий	Мониторинг	Поддержка действий в ЧС
Функциональные задачи	Полевые обследования территории	Визуализация оперативной обстановки	Оперативное моделирование затоплений
	Картографический анализ	Анализ данных	Формирование рекомендаций по управлению в ЧС
Использование результатов	Определение приоритетных мероприятий по предупреждению ЧС	Контроль оперативной обстановки	Спасательные работы, ликвидация последствий ЧС
Мероприятия	долгосрочные	оперативные	экстренные

Рис. 1. Функциональные задачи, решаемые системой в различных режимах функционирования

Набор решаемых функциональных задач информационного обеспечения поддержки управления позволяет использовать экспертную ГИС «Паводки» при планировании и проведении большинства мероприятий обеспечения территориальной безопасности – от долгосрочных предупредительных, до оперативных, когда решения принимаются в условиях дефицита времени и ресурсов.

Примеры работы системы «Паводки»

Экспертная геоинформационная система «Паводки» применяется для автоматизации задач мониторинга паводковой обстановки и информационной поддержки управления в Главном управлении МЧС России по Красноярскому краю.

Планирование долгосрочных превентивных противопаводковых мероприятий (отсыпка защитных дамб, ремонт плотин, берегоукрепительные и другие работы) основано на результатах полевых обследований территорий с повышенным риском и моделирования последствий затопления различной обеспеченности. На рисунке 2 показаны результаты моделирования подъема уровня воды в реке Кан на 6 метров в

районе города Зеленогорска. Такая ситуация может возникнуть при прохождении паводка 1 % обеспеченности и в результате образования затора льда перед плотиной Красноярской ГРЭС-2. Поскольку при ЧС такого масштаба затопляется обширная территория в районе городских карьеров, городской совет принял решение о внесении корректировок в генеральный план перспективной застройки города.

Подобные работы проведены для сельских населенных пунктов центральных и южных районов края и на основе оценок ущербов аварий на ГТС и затоплений населенных пунктов сформированы рекомендации по проведению противопаводковых мероприятий для Министерства природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края [9].

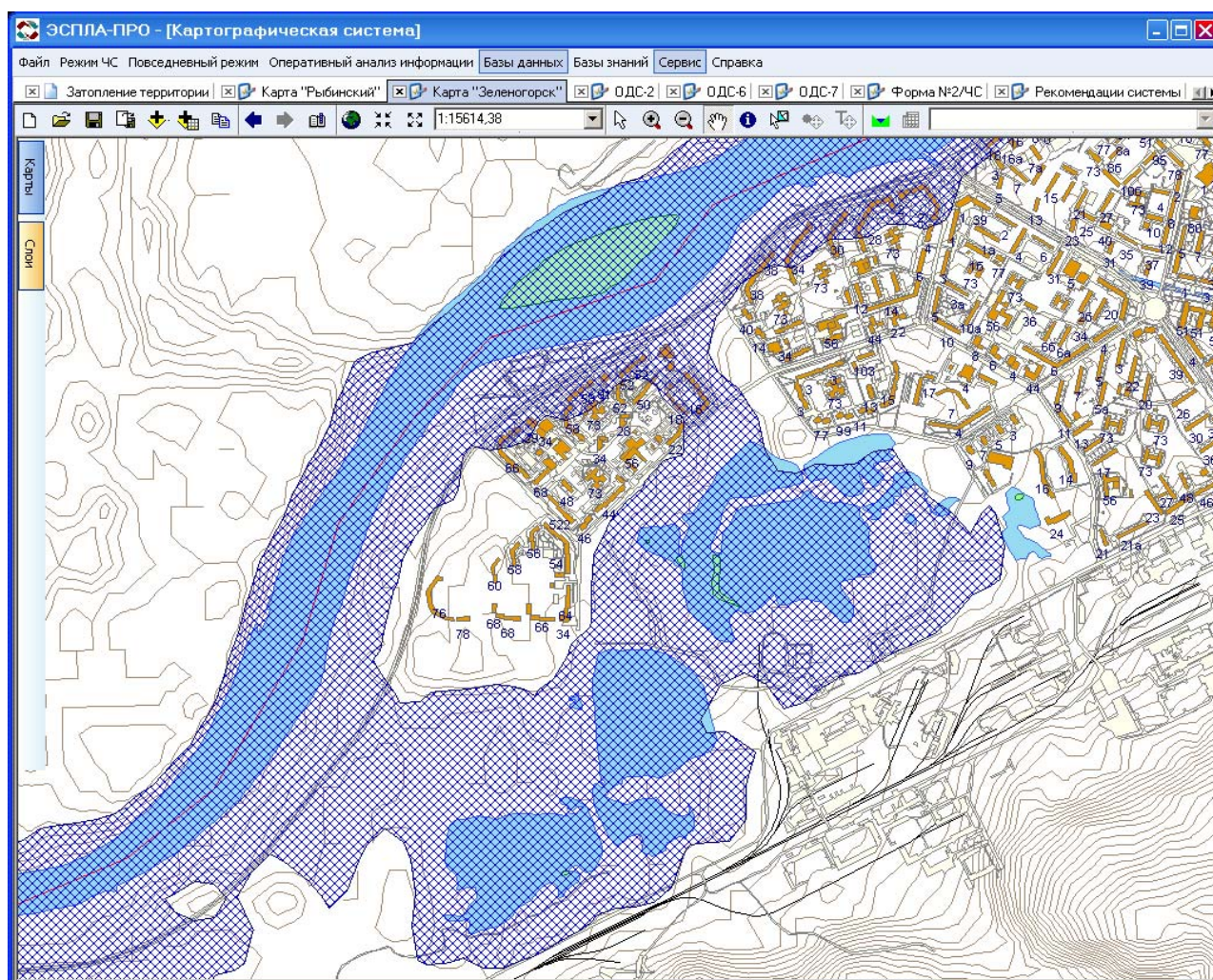


Рис. 2. Использование результатов моделирования для зонирования территорий по рискам ЧС

Мониторинг оперативной обстановки

Данные комплексного мониторинга обстановки являются основой для прогнозирования ситуации и принятия превентивных мер по защите от ЧС. Сибирский регион имеет редкую, по сравнению с европейской частью РФ, сеть метеостанций, гидрологических постов и других пунктов наблюдений. Поэтому, для получения достоверных оценок развития гидрологической обстановки важно использование всех доступных источников информации: донесений с мест, данных космического мониторинга, экспертных оценок, подготовленных на основе базы прецедентов и других материалов.

За период 2000 – 2011 гг. на территории Сибирского федерального округа зафиксировано более тысячи случаев затоплений территорий. Для паводков в Сибири характерен большой охват территории, когда при большой водности в бассейне крупной реки подтапливаются населенные пункты, как по ее берегам, так и на притоках. Другими словами, разлив одной реки (прохождение волн половодья) может сопровождаться затоплением 5 – 10 и более населенных пунктов. После постройки ГЭС это происходит, в основном, на незарегулированных реках (Иртыше, Лене, Вилюе, притоках Оби, Енисея, Ангары). В нижнем течении крупных рек часто затопления вызываются заторами льда, для предотвращения которых проводятся взрывные работы. Только на реках бассейна Енисея (включая Ангару) таких участков более 80-ти. Неудовлетворительное состояние малых гидротехнических сооружений (ГТС), прежде всего плотин водо-

хранилищ и защитных дамб, также приводит к различного рода авариям, связанным с образованием волны прорыва, затоплением объектов и инфраструктуры территорий в нижних бьефах ГТС.

Масштаб большинства наводнений не превышает муниципального, а ущерб составляет от 1 до 50 млн. рублей. Кроме затоплений населенных пунктов (жилых, производственных зданий, объектов социально-бытового назначения) обычно затопляются и выходят из строя автодороги, мосты, ЛЭП и др., земли сельскохозяйственного назначения (в том числе огороды, садовые участки) и лесного фонда.

Ежедневный сбор информации ведется по следующим направлениям: метеорологическая, гидрологическая, ледовая обстановка, ЧС на контроле, состояние сил и средств, запасы материально-технических ресурсов, проведенные и планируемые мероприятия. Поскольку данные поступают в разных форматах, разработаны модули ввода, автоматизирующие процесс пополнения баз данных. Например, метеоданные импортируются из сети Интернет, где ежедневно публикуются данные, собираемые 5300 метеостанциями мира. Из более чем 40 параметров обстановки для оценки гидрологической обстановки используются температуры воздуха (минимальная и максимальная на сутки), осадки, толщина снежного покрова, атмосферное давление и погода на час измерений.

Модуль анализа данных мониторинга позволяет представить основные тренды в виде различных графиков и диаграмм с возможностью сравнения данных за аналогичный период прошлых лет. На основе данных вида «дата – параметр – пространственная привязка» система строит динамические карты оперативной обстановки. Пользователь может выбирать произвольный период для анализа, настраивать вид аналитических форм, сохранять их для отчетов.

За период эксплуатации системы накоплен большой объем данных оперативного мониторинга обстановки. Кроме того, в систему интегрированы архивные данные на территорию Красноярского края (прецеденты затоплений населенных пунктов за 40 лет, максимальные уровни воды и метеоданные за 100 лет, работа ГЭС с 1995 года и т. д.). Это позволило провести детальный анализ рисков затоплений, построить Паводковый атлас края, сформировать рекомендации по проведению стратегических предупредительных мероприятий по снижению рисков затоплений.

Для более детального анализа выборки из больших наборов применяются средства оперативного анализа данных (OLAP) и ГИС. Построен ряд аналитических моделей на основе данных произошедших чрезвычайных ситуаций и происшествий, их предпосылок с учетом изменения гидрологической и метеорологической обстановки. Основу аналитических моделей событий составляет гиперкуб данных, где измерениями являются территория, время, тип события, а показателями – количество, ущерб, число пострадавших и другие показатели мониторинга обстановки.

Информационная поддержка управления в условиях ЧС

Основой оценки обстановки и динамики ЧС является моделирование процесса затопления территории. В ИВМ СО РАН разработаны алгоритмические и программные средства, позволяющие на основе цифровой модели рельефа строить зоны затопления. После расчета происходит визуализация зон затопления, с учетом уклона рек на больших территориях, моделируется поднятие уровня воды в сложных гидросистемах с несколькими водотоками. Метод апробирован на территориях с различными ландшафтными условиями.

На основе картографического анализа последствий ЧС система формирует перечень подтопленных объектов, и ряд документов, в том числе: текст оповещения населения; план по эвакуации людей и материальных ценностей; данные по силам и средствам; информация о транспортном, материально-техническом и других видах обеспечения.

Работа системы «Паводки» при поступлении сигнала о затоплении территории происходит следующим образом. Дежурный оперативной смены запускает режим ЧС, выбирает из списка населенный пункт, задает уровень воды. При необходимости система задает вопросы, уточняющие обстановку (характер паводка, тип водотока и др.). В соответствии с заданной моделью ситуации экспертная система выполняет следующие действия:

- запрашивает у пользователя тип ЧС и в зависимости от этого загружает необходимый модуль расчета масштабов аварии;
- производит расчет зон действия поражающих факторов ЧС, выводит отчет результаты моделирования;
- запрашивает у пользователя информацию о месте аварии;
- моделирует зону поражения, формирует тематическую карту и список объектов в зоне ЧС.

В результате работы системы формируется набор документов: текст оповещения населения, формы ЧС, оперативная карта зоны затопления с перечнем затопленных объектов, рекомендации по эвакуации населения, привлечению сил и средств и другая необходимая информация. Все расчеты занимают 2 – 5 минут, а объем формируемой информации равнозначен результатам работы оперативного штаба, состоящего из нескольких специалистов по направлениям.

Следует отметить, что от степени наполнения баз данных зависит полнота заполнения форм донесений. Например, практически всю информацию по силам и средствам, необходимую для заполнения формы 3/ЧС «Состав привлекаемых сил и средств для ликвидации ЧС», можно заранее формализовать в виде иерархических таблиц ведомственной подчиненности, а планы привлечения формирований для ликвидации ЧС – в виде наиболее вероятных сценариев развития ситуации баз знаний системы.

Заключение

Экспертная геоинформационная система "Паводки" является новым комплексным подходом автоматизации процессов принятия решений в паводкоопасных ситуациях. Как показал опыт эксплуатации, выбранная технология построения системы [5, с. 46 – 54] позволяет оперативно увеличить функциональность и информационное наполнение системы. Использование системы позволяет не только сократить время формирования решений и документов, повысить эффективность работы оперативных подразделений МЧС России, но и способствует повышению общего уровня квалификации специалистов, прозрачности информационных потоков, большей стандартизации всей системы управления.

Литература

1. Mike3 – software Products / Danish Hydraulics. – 1999. – № 19.
2. Russ Johnson. A Case Study in Multiagency GIS for Managing a Large-Scale Natural Disaster. Global Risk Forum, Davos, Switzerland, 2008.
3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Региональные проблемы безопасности. Красноярский край. – М.: Знание, 2001. – 500 с.
4. Библиотека бесплатных программ Национального Агентства по чрезвычайным ситуациям США (FEMA) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=2300>.
5. Средства построения систем поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации ЧС. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций / Л. Ф. Ноженкова, С. В. Исаев, В. В. Ничепорчук [и др.]. – М., 2008. – № 4.
6. Ничепорчук, В. В. Методические и программные средства поддержки принятия решений в паводкоопасных ситуациях: автореф. дис. ...канд. техн. наук / В. В. Ничепорчук. – Красноярск, 2002. – 20 с.
7. Обеспечение мероприятий и действий сил по ликвидации чрезвычайных ситуаций / под общей ред. С. К. Шойгу. – М., 1998. – 170 с.
8. Постановление Правительства Красноярского края от 20.06.2007 г. № 241-п "О сети наблюдения и лабораторного контроля Красноярского края.
9. Предпаводковое и послепаводковое обследование водохозяйственных систем и зон затопления в Шарыповском, Назаровском и Боготольском районах водотоков рек Обьют, Березовка, Сerez, Акатка, Улуй, Айдат и других, Красноярский край. Отчет о НИР. – Красноярск: СНИИГиМ. – 2011. – 161 с.
10. Приказ МЧС России от 4.03.2011 г. № 94 «Об утверждении положения о функциональной подсистеме мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».
11. Центр исследования экстремальных ситуаций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.esrc.ru/index.php?page=gis>.

Информация об авторах:

Ноженкова Людмила Федоровна – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института вычислительного моделирования СО РАН, т. 8(391)290-79-53, expert@icm.krasn.ru.

Nozhenkova Lyudmila Fedorovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director at the Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the RAS.

Ничепорчук Валерий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВМ СО РАН, т. 8(391) 290-74-53, valera@icm.krasn.ru.

Nicheporuk Valeriy Vasilievich – Candidate of Technical Sciences, senior researcher at the Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the RAS.

АЛГОРИТМЫ СПЕКТРАЛЬНО-ТЕКСТУРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ СПУТНИКОВЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

И. А. Пестунов, С. А. Рылов

SPECTRAL-TEXTURAL SEGMENTATION ALGORITHMS
FOR SATELLITE IMAGES WITH HIGH SPATIAL RESOLUTION

I. A. Pestunov, S. A. Rylov

Предлагаются алгоритмы спектрально-текстурной сегментации изображений. Приводятся результаты экспериментов на модельных и реальных изображениях, подтверждающие вычислительную эффективность предложенных алгоритмов и высокое качество получаемых картосхем.

Algorithms for multispectral image segmentation based on joint use of spectral and textural features are proposed. Results on the model and real images experiments confirming their efficiency are presented.

Ключевые слова: спутниковые изображения высокого разрешения, сегментация изображений, спектральные и текстурные признаки.

Keywords: satellite images with high spatial resolution, image segmentation, spectral and textural features.

Введение

Сегментация является одним из важнейших этапов анализа цифровых изображений [1, с. 346 – 362]. Она заключается в разбиении изображения на непересекающиеся области на основе однородности (похожести) их спектральных и (или) пространственных (текстура, форма, контекст и т. п.) характеристик. Методы сегментации изображений нашли широкое применение во многих прикладных областях, включая дистанционное зондирование Земли из космоса [2, с. 31 – 42].

С каждым годом растет число запускаемых спутников, обеспечивающих поставку многоспектральных изображений высокого пространственного разрешения (10 м и менее) [3, с. 11 – 17]. Их особенность состоит в том, что значительная часть информации о представленных на них объектах заключена в текстуре изображения. Применительно к таким изображениям, традиционные методы сегментации, учитывающие лишь спектральные характеристики, оказываются непригодными, поскольку приводят к чрезмерной фрагментации однородных по текстуре областей. Не являются исключением и методы, реализованные в известных пакетах программ обработки спутниковых изображений (ERDAS Image, ENVI и др.).

В связи с этим разработка методов и программно-алгоритмических средств так называемой спектрально-текстурной сегментации многоспектральных изображений в настоящее время является весьма актуальной задачей [4, с. 2479 – 2501].

В данной работе предлагается метод спектрально-текстурной сегментации спутниковых изображений, основанный на непараметрических алгоритмах кластеризации и свободный от проблемы введения единой метрики в пространстве спектральных и текстурных признаков.

Основная идея предлагаемого метода заключается в разделении процесса сегментации на два этапа. На первом этапе производится сегментация исходного изображения по спектральным признакам, а на втором – сегментация картосхемы, полученной на первом этапе, по текстурным признакам. Такой подход позволяет избежать традиционных трудностей, связанных с введением единой метрики, которая необходима при кластеризации данных в пространстве разнородных признаков.

Ниже приводится описание алгоритмов, применяемых при реализации этого метода.

Алгоритм сегментация изображения по спектральным признакам

Для сегментации изображения по спектральным признакам применяется ансамблевый алгоритм кластеризации *ЕССА* (Ensemble of Combined Clustering Algorithms) [5], краткое описание которого приводится ниже.

Пусть $X = \{x_i = (x_i^1, \dots, x_i^d) \in R^d, \quad i = \overline{1, N}\}$ – множество векторов спектральных яркостей, характеризующих d -спектральное изображение. Векторы x_i лежат в прямоугольном гиперпараллелепипеде $\Omega = [l^1, r^1] \times \dots \times [l^d, r^d]$, где $l^j = \min_{x_i \in X} x_i^j$, $r^j = \max_{x_i \in X} x_i^j$. Под сеточной структурой будем понимать разбиение пространства спектральных признаков гиперплоскостями:

$$x^j = (r^j - l^j) \cdot i / m + l^j, \quad i = 0, \dots, m$$

(m – число разграниченных участков по каждой размерности). Минимальным элементом этой структуры является клетка (замкнутый прямоугольный гиперпараллелепипед, ограниченный гиперплоскостями). Введём общую нумерацию клеток (последовательно от одного слоя клеток к другому).

Клетки B_i и B_j ($i \neq j$) являются смежными, если их пересечение не пусто. Множество смежных с B клеток обозначим через A_B . Плотностью D_B клетки B назовём отношение $D_B = N_B / V_B$, где N_B – количество элементов множества X , попавших в клетку B ; V_B – объём клетки B . Клетку B будем считать непустой, если $D_B \geq \tau$, где τ – величина заданного порога. Все точки множества X , попавшие в клетки с плотностью меньше τ , будем относить к «шуму». Обозначим множество всех непустых клеток через $\aleph$. Непустая клетка B_i непосредственно связана с непустой клеткой B_j ($B_i \rightarrow B_j$), если B_j – максимальная по номеру клетка, удовлетворяющая условиям:

$$B_j = \arg \max_{B_k \in A_{B_i}} D_{B_k} \text{ и } D_{B_j} \geq D_{B_i}.$$

Непустые клетки B_i и B_j непосредственно связаны ($B_i \rightleftharpoons B_j$), если $B_i \rightarrow B_j$ или $B_j \rightarrow B_i$. Непустые клетки B_i и B_j связаны ($B_i \sim B_j$), если существуют $k_1, \dots, k_l$ такие, что $k_1 = i$, $k_l = j$ и для всех $p = 1, \dots, l-1$ выполнено $B_{k_p} \rightleftharpoons B_{k_{p+1}}$.

Введение отношения связности порождает естественное разбиение множества непустых клеток на компоненты связности $\{G_i, i = 1, \dots, S\}$. Под компонентой связности будем понимать максимальное множество попарно связанных клеток. Представителем компоненты связности G назовём клетку $Y(G)$, удовлетворяющую условию:

$$Y(G) = \arg \max_{B \in G} D_B$$

(если несколько клеток удовлетворяют данному условию, то $Y(G)$ выбирается из них случайным образом). Компоненты связности G' и G'' смежные, если существуют смежные клетки B' и B'' такие, что $B' \in G'$ и $B'' \in G''$. Смежные компоненты связности G_i и G_j связаны ($G_i \sim G_j$), если существует набор клеток (путь)

$$P_{ij} = \{Y_i = B_{k_1}, \dots, B_{k_l}, \dots, B_{k_l} = Y_j\}$$

такой, что:

- 1) для всех $t = 1, \dots, l-1$ $B_{k_t} \in G_i \cup G_j$ и $B_{k_t}, B_{k_{t+1}}$ – смежные клетки;
- 2) $\min_{B_{k_t} \in P_{ij}} D_{B_{k_t}} / \min(D_{B_{Y_i}}, D_{B_{Y_j}}) > T$, $T > 0$ – порог объединения.

Определение. Кластером C назовем максимальное множество попарно связанных компонент связности, то есть 1) для любых компонент связности $G_i, G_j \in C$ выполнено $G_i \sim G_j$; 2) для любых $G_i \in C$, $G_j \notin C$ верно $G_i \not\sim G_j$.

С учетом изложенного, задача кластеризации заключается в разбиении множества $\aleph$ на совокупность кластеров $\{C_i, i = 1, \dots, M\}$ таких, что $\aleph = \bigcup_{i=1}^M C_i$ и $C_i \cap C_j = \emptyset$ при $i \neq j$; число кластеров M заранее неизвестно.

Далее опишем эффективный метод решения этой задачи, основанный на ансамблевом подходе.

Предлагаемый метод опирается на сеточный алгоритм CCA [6], где m – число разбиений, T – порог объединения компонент связности, τ – порог шума). В работе этого алгоритма можно выделить три основных этапа.

1. Формирование клеточной структуры. На этом этапе для каждой точки $x_i \in X$ определяется содержащая её клетка, вычисляются плотности D_B всех клеток и выявляются непустые клетки.
2. Выделение компонент связности $G_1, \dots, G_S$ и поиск их представителей $Y(G_1), \dots, Y(G_S)$.
3. Формирование кластеров $C_1, \dots, C_M$ в соответствии с указанным выше определением на основе выделенных компонент связности.

Алгоритм $CCA(m, T, \tau)$ является вычислительно эффективным в пространстве признаков небольшой размерности (≤ 6) [6, с. 149 – 152], его сложность составляет $O(dN + dm^d)$, где N – число классифицируемых объектов, d – размерность пространства признаков.

Однако CCA относится к классу алгоритмов с фиксированной сеткой и поэтому результаты его работы существенно зависят от параметра m , который определяет масштаб элементов сеточной структуры. На практике эта неустойчивость результатов значительно затрудняет настройку параметров алгоритма.

Известно [7, с. 583 – 617], что устойчивость решений в задачах кластеризации может быть повышена благодаря формированию ансамбля алгоритмов и построению на его основе коллективного решения. При этом используются результаты, полученные разными алгоритмами либо одним алгоритмом с различными значениями параметров. Кроме того, для формирования ансамбля могут быть применены разные подсистемы переменных. Ансамблевый подход является одним из наиболее перспективных направлений в кластерном анализе [8, с. 651 – 666].

В описываемом алгоритме $ECCA$ для формирования ансамбля используются результаты выполнения алгоритма $CCA(m, T, \tau)$ с различными значениями параметра m , а для формирования итогового коллективного решения – применить метод, основанный на нахождении согласованной матрицы подобия (или различия) объектов [9]. Этот метод может быть описан следующим образом.

Пусть с помощью некоторого алгоритма кластеризации ($\mu = \mu(\Theta)$), зависящего от случайного вектора параметров $\Theta \in \Theta$ (здесь Θ – некоторое допустимое множество параметров), получен набор частных решений $\mathbb{Q} = \{Q^{(1)}, \dots, Q^{(l)}, \dots, Q^{(L)}\}$, где $Q^{(l)}$ – l -й вариант кластеризации, содержащий $M^{(l)}$ кластеров.

Обозначим через $H(\Theta_l)$ бинарную матрицу $H(\Theta_l) = \{H_{i,j}(\Theta_l)\}$ размерности $N \times N$, которая для l -й группировки вводится как

$$H_{i,j}(\Theta_l) = \begin{cases} 0, & \text{если объекты отнесены в один} \\ 1, & \text{кластер,} \\ & \text{иначе} \end{cases}$$

После построения L частных решений можно сформировать согласованную матрицу различий

$$\mathbf{H} = \{\mathbf{H}_{i,j}\}, \quad \mathbf{H}_{i,j} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L H_{i,j}(\Theta_l),$$

где $i, j = 1, \dots, N$. Величина $\mathbf{H}_{i,j}$ равна частоте классификации x_i и x_j в разные группы в наборе группировок $\mathbb{Q}$. Близкое к нулю значение величины означает, что данные объекты имеют большой шанс попадания в одну и ту же группу. Близкое к единице значение этой величины свидетельствует о том, что шанс оказаться в одной группе у объектов незначителен.

В нашем случае $\mu = CCA(m, T, \tau)$, где число разбиений $m \in \{m_{\min}, m_{\min} + 1, \dots, m_{\min} + L\}$, а объектами классификации будут являться представители компонент связности $Y(G_1), \dots, Y(G_S)$.

После вычисления согласованной матрицы различий для нахождения коллективного решения применим стандартный агломеративный метод построения дендрограммы, который в качестве входной информации использует попарные расстояния между объектами [10]. При этом расстояния между группами будем определять по принципу «средней связи», т. е. как среднее арифметическое попарных расстояний между объектами, входящими в группы. Процесс объединения продолжается до тех пор, пока расстояние между ближайшими группами не превысит заданное пороговое значение T_d , принадлежащее отрезку $[0, 1]$. Этот метод позволяет выделять иерархическую структуру кластеров, которая упрощает процесс интерпретации результатов.

В соответствии с описанным выше методом разработан и программно реализован на языке Java ансамблевый алгоритм $ECCA(m_{\min}, L, T, \tau, T_d)$. Для работы алгоритма необходимо задать значения пяти параметров: $m_{\min}, L, T, \tau, T_d$. Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные на модельных и реальных данных, показали, что при использовании 8 – 10 элементов ансамбля получаемые результаты являются устойчивыми к выбору параметра сетки $m_{\min}$. Параметр T оказывает слабое влияние на результат кластеризации. При обработке изображений параметр T выбирался равным 0,8, а порог шума $\tau \in \{0, 1\}$. Алгоритм $ECCA$ позволяет получать иерархическую структуру данных. Проведенные

исследования показали [5], что параметр T_d , задающий глубину иерархии, достаточно выбирать из множества $\{0, 0.1, \dots, 0.9\}$.

С помощью алгоритма *ECCA* производится сегментация изображения по спектральным признакам, результатами которой является картосхема изображения.

Сегментация картосхемы по текстурным признакам

Алгоритм кластеризации *ECCA* позволяет разбить изображение на однородные по спектральным признакам области без какого-либо учета их текстурных характеристик. Поэтому картосхема, получаемая после первого этапа обработки спутникового изображения высокого пространственного разрешения, представляет собой, как правило, чрезмерно раздробленную картину. На ней присутствует множество спектральных классов, которым нет соответствия среди реальных (информационных) классов, интересных пользователю.

На втором этапе обработки производится сегментация картосхемы по текстурным признакам и снижение ее раздробленности.

Для описания соответствующего этому этапу алгоритма введем необходимые обозначения.

Пусть картосхема, полученная в результате применения алгоритма *ECCA*, состоит из $N_r \times N_c = N$ элементов. Разобьем ее на квадратные фрагменты размером $k \times k$ элементов. Для простоты положим, что числа N_r и N_c кратны k . Каждому из таких фрагментов f_{ij} , $i = 1, \dots, N_r / k$; $j = 1, \dots, N_c / k$, сопоставим вектор $z_{ij} = (z_{ij}^1, \dots, z_{ij}^M) \in R^M$. Здесь $z_{ij}^l = N_{ij}^l / k^2$, где N_{ij}^l – число элементов фрагмента f_{ij} , относящихся к кластеру с номером l , $l = 1, \dots, M$.

Вектор z_{ij} фактически содержит в себе информацию о текстурной композиции элементов картосхемы в пределах фрагмента f_{ij} . Поэтому кластеризация векторов z_{ij} приведет к сегментации картосхемы по текстуре.

В качестве меры близости между двумя такими векторами $x = (x^1, \dots, x^M)$ и $y = (y^1, \dots, y^M) \in R^M$ примем метрику $\mu(x, y) = 1 - \sum_{i=1}^M \min(x^i, y^i)$.

Процедура кластеризации векторов z_{ij} выполняется в три этапа. На первом этапе осуществляется поиск центров кластеров с помощью простого алгоритма *DINA* [11, с. 45]. На втором этапе полученные центры анализируются на предмет близости друг к другу. Если какие-либо два центра находятся на расстоянии меньше r (заданный радиус сферы), то они объединяются в один центр, соответствующий центру тяжести их внутренних точек. На третьем этапе осуществляется классификация векторов путем отнесения их к ближайшему центру, лежащему на расстоянии не превышающем r .

Кластеры, число элементов которых меньше порога τ (задаваемого в процентах от общего числа фрагментов картосхемы), относятся к «шуму». Попавшие в «шум» фрагменты обрабатываются поэлементно. Каждый элемент «шумового» фрагмента относится к тому из соседних расклассифицированных фрагментов, в котором чаще встречаются представители спектрального кластера, содержащего обрабатываемый элемент.

Границы однородных текстурных областей, выделенных на картосхеме в ходе второго этапа сегментации, являются очень грубыми. Для их уточнения последовательно рассматриваются пограничные элементы всех выделенных текстурных областей и содержащие их фрагменты. Рассматриваемый пограничный элемент может либо остаться в текущей области, либо переместиться в смежную (если спектральный кластер, к которому он отнесен, чаще встречается в текстурном кластере смежного фрагмента, чем в содержащем его). После этого рассматриваемый элемент считается частью границы той области, к которой он отнесен. Процесс продолжается до тех пор, пока все пограничные элементы всех текстурных областей не будут рассмотрены.

Предложенный алгоритм текстурной сегментации картосхемы реализован на языке Java в виде модуля *STSA* с входными параметрами k, r, τ .

Результаты экспериментальных исследований

В данном разделе представлены результаты сегментации модельных и реальных изображений с использованием модулей *ECCA* и *STSA*, подтверждающие вычислительную эффективность предложенного метода. Обработка проводилась на ПЭВМ с тактовой частотой 3.3 ГГц.

Во всех экспериментах при работе алгоритма *ECCA* использовался ансамбль из восьми элементов, а для модуля *STSA* значения параметров r и τ полагались равными 0.4 и 1 соответственно.

На рисунке 1 представлены результаты сегментации цветного изображения размером 600×450 пикселей. При работе модуля *STSA* параметр $k = 15$. Общее время обработки 0.3 с.

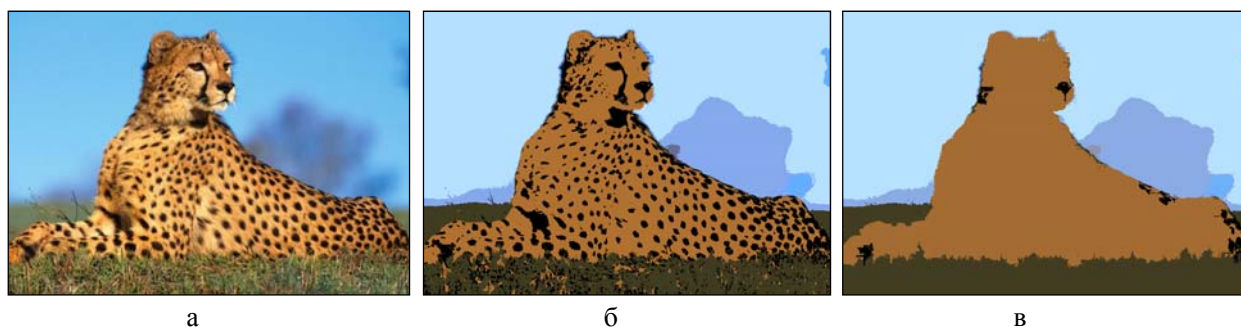


Рис. 1. а – исходное изображение; б, в – результаты сегментации по спектральным и спектрально-текстурным признакам соответственно

На рисунках 2 и 3 представлены примеры сегментации двух модельных RGB-изображений размером 800×800 и 858×572 пикселей соответственно. Картосхемы, полученные в ходе выполнения алгоритма *ЕССА*, разбивались на фрагменты размером 12×12 пикселей для первого и 22×22 пикселей для второго изображения.

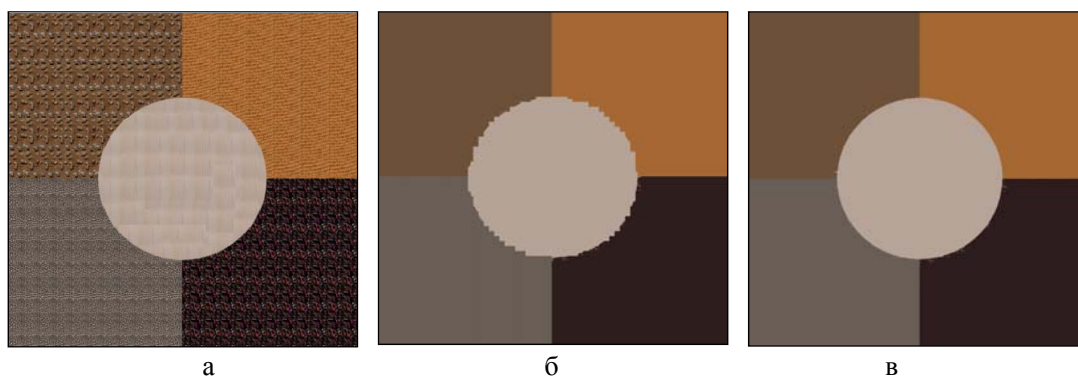


Рис. 2. а – исходное изображение; б, в – результаты сегментации до и после коррекции границ соответственно

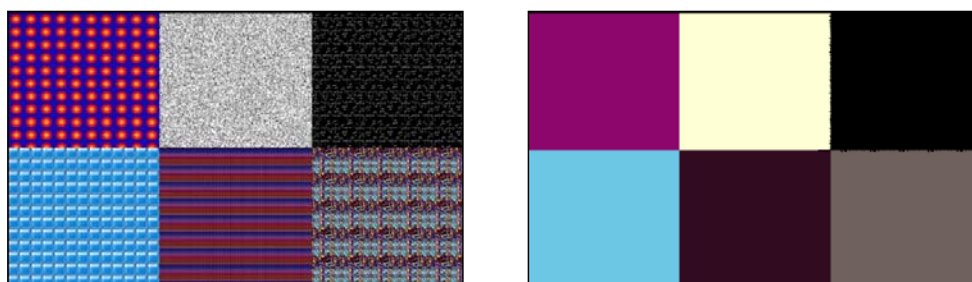


Рис. 3. Исходное изображение (слева) и результаты сегментации (справа)

На рисунке 4 представлены результаты сегментации фрагмента снимка новосибирского Академгородка размером 2701×2458 пикселей, полученного со спутника QuickBird 22 октября 2008 г. Для обработки использовались три спектральных канала (2, 3 и 4). Картосхема, полученная в результате применения *ЕССА*, разбивалась на фрагменты размером 12×12 пикселей. Общее время обработки 2.6 с.

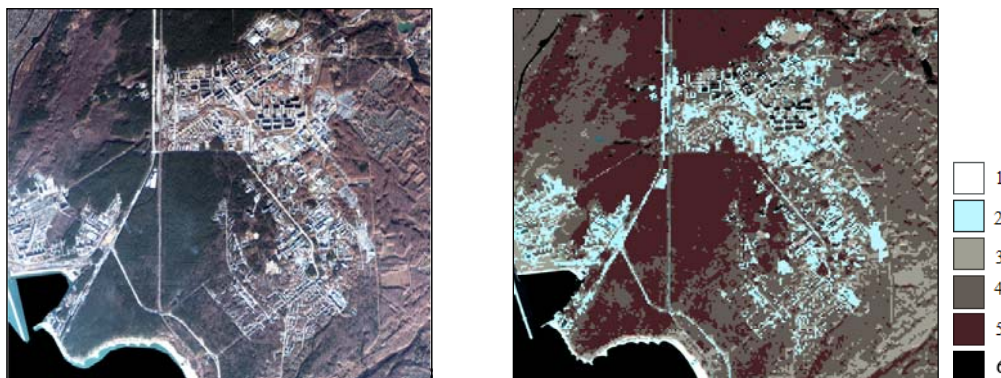


Рис. 4. Слева – фрагмент синтезированного изображения QuickBird, построенного по 4, 3 и 2 каналам; справа – результаты сегментации. Выделено 6 кластеров (1 – песок; 2 – здания, сооружения, дороги; 3 – травянистая растительность; 4 – лиственные насаждения; 5 – сосновые насаждения; 6 – вода).

Заключение

В работе предложены двухэтапный метод и алгоритмы сегментации изображений высокого пространственного разрешения на основе совместного использования спектральных и текстурных признаков. Приведены результаты экспериментов на модельных и реальных изображениях, подтверждающие вычислительную эффективность предложенных алгоритмов и высокое качество получаемых картосхем.

Литература

1. Zhang, D. A review on automatic image annotation techniques [Текст] / D. Zhang, D. Zhang, M. Islam, G. Lu // Pattern Recognition. – 2012. – Vol. 45.
2. Dey, V. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective [Текст] / V. Dey, Y. Zhang, M. Zhong // ISPRS TC VII Symposium - 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5 – 7, 2010. IAPRS. – Vol. XXXVIII. – Part 7A.
3. Болсуновский, М. Л. Развитие систем ДЗЗ и информационно-аналитического обеспечения данными космической съемки: ближайшие перспективы [Текст] / М. Л. Болсуновский, Б. А. Дворкин // Геоинформатика. – 2010. – № 4.
4. Plea, D. E. Image segmentation based on the integration of colour-texture descriptors. – A review [Текст] / D. E. Plea, P. F. Whelan // Pattern Recognition. – 2011. – Vol. 44.
5. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных [Текст] / И. А. Пестунов, В. Б. Бериков, Е. А. Куликова, С. А. Рылов // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 3.
6. Куликова, Е. А. Nonparametric clustering algorithm for large datasets [Текст] / Е. А. Куликова, И. А. Пестунов, Ю. Н. Синявский // Математические методы и распознавание образов: труды 14 конф. – Изд-во MAKS Press, 2009.
7. Strehl, A. Clustering ensembles – a knowledge reuse framework for combining multiple partitions [Текст] / A. Strehl, J. Ghosh // The Journal of Machine Learning Research. – 2002. – Vol. 38.
8. Jain, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means [Текст] / A. K. Jain // Pattern Recognition Letters. – 2010. – Vol. 31. – Is. 8.
9. Berikov, V. B. Construction of the ensemble of logical models in cluster analysis [Текст] / В. Б. Бериков // Lecture Notes in Artificial Intelligence. – 2009. – LNAI 5755.
10. Дуда, Р. П. Распознавание образов и анализ сцен. [Текст] / Р. Дуда, М. Харт. – М: Мир, 1976. – 559 с.
11. Загоруйко, Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний [Текст] / Н. Г. Загоруйко. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999.

Информация об авторах:

Пестунов Игорь Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией обработки данных Института вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН), т. 8(383)334-91-55, pestunov@ict.nsc.ru

Pestunov Igor Alexeevich – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Laboratory for Data Processing at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Рылов Сергей Александрович – магистрант Новосибирского государственного университета, т. 8(383)334-91-55, rylovs@mail.ru

Rylov Sergey Alexandrovich – Master's programme student at Novosibirsk State University.

АЛГОРИТМЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ СЕГМЕНТАЦИИ
СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

И. А. Пестунов, Ю. Н. Синявский

CLUSTERING ALGORITHMS IN SATELLITE IMAGES SEGMENTATION TASKS

I. A. Pestunov, Yu. N. Sinyavskiy

*Работа выполнена в Институте вычислительных технологий СО РАН.**Настоящий обзор посвящён алгоритмам кластеризации и возможности их применения к задачам сегментации спутниковых изображений. Рассмотрены основные подходы к разработке алгоритмов, дан анализ их достоинств и недостатков.**A review of clustering algorithms and their applicability for satellite images segmentation is presented. The main approaches to the algorithm creation are introduced. An analysis of their strengths and weaknesses is given.***Ключевые слова:** кластеризация данных, сегментация спутниковых изображений.**Keywords:** data clustering, satellite images segmentation.**Введение**

Сегментация является одним из важнейших этапов анализа цифровых изображений [67]. Она заключается в разбиении изображения на непересекающиеся области на основе однородности (похожести) их спектральных и/или пространственных (текстура, размер, форма, контекст и др.) характеристик. Методы сегментации нашли широкое применение во многих прикладных областях, включая дистанционное зондирование Земли из космоса [18, с. 48], интерес к которому в последние годы непрерывно возрастает.

Наиболее распространенный подход к сегментации спутниковых изображений основан на использовании алгоритмов кластеризации данных [49]. Термин «кластеризация данных» («data clustering») впервые появился в заголовке статьи 1954 года, посвящённой обработке антропологических данных [32]. Для этого термина существует ряд синонимов: автоматическая классификация, классификация без обучения (без учителя), классификация с самообучением, таксономия, группировка, стратификация, типизация и др. [66].

Содержательная постановка задачи кластеризации заключается в следующем. Пусть имеется выборка объектов $\Omega = \{\omega^{(1)}, \dots, \omega^{(N)}\}$, сформированная в результате выбора представителей из некоторой генеральной совокупности. Каждый объект исходной выборки $\omega^{(i)}$ описывается вектором признаков $x^{(i)} = x(\omega^{(i)}) = (x_1^{(i)}, \dots, x_k^{(i)}) \in R^k$. Иногда, в силу особенностей решаемой задачи, выборка Ω описывается матрицей коэффициентов попарного сходства/различия. При k -спектральной съёмке значение $x_j^{(i)}$, $j \in \{1, \dots, k\}$ характеризует спектральную яркость пикселя $x^{(i)}$ в j -м диапазоне спектра. Задача кластеризации заключается в разбиении выборки на сравнительно небольшое, заранее известное или нет, число $M \geq 2$ групп объектов (кластеров) так, чтобы элементы одного кластера были как можно более схожи, а элементы из разных кластеров существенно различались по заданному критерию сходства/различия.

Задача кластеризации спутниковых данных обладает следующими особенностями:

- 1) большой объём обрабатываемых данных (порядка $10^6 - 10^7$ пикселей);
- 2) отсутствие априорной информации о количестве и вероятностных характеристиках классов (при исследовании природных объектов получение априорной информации зачастую связано со значительными и не всегда оправданными затратами ресурсов);
- 3) наличие «шума» и выбросов в данных.

Указанные особенности накладывают ограничения на алгоритмы кластеризации, подходящие для обработки спутниковых изображений. «Хороший» алгоритм кластеризации должен соответствовать следующим основным требованиям:

- 1) низкая вычислительная сложность;
- 2) возможность выделять кластеры разной структуры (формы, размера, плотности) с использованием минимального количества априорных знаний и предположений;
- 3) выделение заранее неизвестного числа кластеров;
- 4) возможность обрабатывать данные в присутствии «шума» и выбросов;
- 5) простота настройки параметров.

К настоящему времени разработано большое количество различных алгоритмов кластеризации и их модификаций. Опубликовано множество обзорных статей [8, 31, 33, 34, 40, 59] и монографий, полностью [3, 26, 29, 58, 69, 70, 73] или частично [20, 66, 68, 78] посвящённых кластеризации. Цель настоящего обзора заключается в анализе возможности применения существующих групп алгоритмов для обработки спутниковых изображений.

1. Основные типы алгоритмов кластеризации

По способу выделения кластеров все алгоритмы автоматической классификации можно разделить на две большие группы – иерархические и неиерархические. Иерархические (hierarchical) алгоритмы позволяют обнаружить вложенные кластеры. Для этого строится либо дерево кластеров, называемое дендрограммой (dendrogram), либо так называемая диаграмма достижимости (reachability plot) [4] (по которой можно построить дендрограмму [9]). Неиерархические алгоритмы вычисляют кластеры, исходя из оптимизации некоторого заранее заданного (явно или неявно) критерия качества.

Неиерархические алгоритмы можно условно разделить на три большие группы: методы разбиений, плотностные методы и сеточные методы. Кроме того, можно выделить обособленную группу неиерархических алгоритмов, называемую нейронными сетями [19]. Они разработаны в рамках концепции соревновательного обучения и пытаются эмулировать поведение нейронов коры головного мозга человека при анализе данных.

Перечисленные группы алгоритмов кластеризации представлены на рисунке. Заметим, что это разбиение условно; часто алгоритмы разрабатываются в рамках комбинации нескольких подходов. На рисунке такие алгоритмы, например DENCLUE и CLIQUE, отнесены одновременно к нескольким группам.

Рассмотрим перечисленные группы алгоритмов более подробно.

2. Иерархические алгоритмы

Иерархические алгоритмы позволяют построить либо дерево кластеров, называемое дендрограммой (dendrogram), либо так называемую диаграмму достижимости (reachability plot) [4]. Требуемый уровень детализации результата достигается за счёт отсечения построенной дендрограммы (или диаграммы достижимости) на определённом уровне с последующим разбиением исходного множества объектов на кластеры.

По способу построения дендрограммы алгоритмы можно разделить на две группы – агломеративные и разделительные. При использовании агломеративных (agglomerative) алгоритмов каждый объект считается одноэлементным кластером, после чего выполняется поэтапное объединение наиболее похожих кластеров. Для разделительных (divisive) алгоритмов, наоборот, вся выборка считается одним кластером и на каждом шаге один из построенных кластеров разбивается на два. И агломеративные, и разделительные алгоритмы просты в реализации и результат их выполнения не зависит от порядка ввода данных. К их недостаткам можно отнести высокую вычислительную сложность (порядка $O(N^3)$), которая не позволяет применять их для обработки больших массивов данных. Кроме того, они не способны одновременно выделять кластеры разной структуры (формы, размера, плотности).

Для увеличения объёма данных, обрабатываемых произвольным агломеративным или разделительным алгоритмом кластеризации, можно использовать методы дробления [16] и повторного дробления [54]. Идея, лежащая в основе этих методов, заключается в разбиении всего множества данных на подмножества («дробки»), которые могут быть обработаны за разумное время, с последующей кластеризацией каждой «дробки». Затем из кластеров, полученных в результате обработки «дробей», формируется множество векторов-описаний (мета-объектов), которое впоследствии разбивается на группы с помощью того же алгоритма кластеризации. Одним из примеров алгоритма дробления является BIRCH [63]. Основным недостатком алгоритма дробления заключается в том, что формирование мета-объектов может привести к ошибке классификации, которую в дальнейшем уже невозможно исправить. Повторное дробление позволяет бороться с этим недостатком. Оно заключается в многократном применении алгоритма дробления: построение «дробей» для последующей итерации осуществляется на основе результатов предыдущей.

Во многих агломеративных и разделительных алгоритмах для описания кластеров используются представители. Представителем кластера может служить как объект исходного множества, так и вектор средних значений (центр масс) кластера. Недостатком всех таких алгоритмов является неспособность выделять кластеры сложной формы (форма выделяемых кластеров определяется используемой метрикой). Один из методов сглаживания этого недостатка и основанный на нём алгоритм CURE описаны в [28]. В качестве представителя каждого кластера предлагается использовать набор объектов, распределённых недалеко от границы. Для повышения разделимости близких кластеров предлагается «сжать» набор представителей, немного сдвинув каждого представителя в направлении центроида соответствующего кластера. Такой подход позволяет разделять кластеры достаточно сложной формы (сложность зависит от количества представителей в описании кластера), но приводит к значительному росту времени обработки.

При обработке больших массивов данных построенная дендрограмма является очень сложной и тяжело интерпретируемой. В таких случаях для визуализации иерархической структуры кластеров целесообразней использовать диаграмму достижимости. Она представляет собой двумерный график, на котором вдоль оси абсцисс расположены точки исходного множества в соответствии с введённым порядком, а вдоль оси ординат – расстояния достижимости. Расстояние достижимости для точки обратно пропорционально плотности в этой точке, поэтому «долины» на диаграмме достижимости соответствуют плотным областям пространства (кластерам), а вложенные «долины» – вложенным кластерам.

Построение диаграммы достижимости (в отличие от дендрограммы) не является итеративным процессом. Поэтому алгоритмы, строящие диаграмму достижимости, являясь иерархическими, не могут быть отнесены ни к агломеративным, ни к разделительным.

Несмотря на предложенные в последние годы модификации, алгоритмы построения дендрограммы «напрямую» не применимы для обработки спутниковых изображений ввиду высокой вычислительной сложности и невозможности одновременного выделения кластеров разной структуры. Однако их использование оправданно на последних этапах многоэтапных процедур (когда объём обрабатываемых данных становится небольшим), т. к. информация об иерархической вложенности кластеров позволяет облегчить интерпретацию результатов сегментации.

3. Методы разбиений

Методы разбиений (partitioning methods) основаны на поэтапном улучшении некоторого начального разбиения исходного множества до получения оптимального значения некоторой целевой функции. В качестве целевой функции часто используется сумма расстояний от объектов до центров кластеров, к которым они отнесены. Основным недостатком методов разбиений, использующих эту целевую функцию, является то, что форма выделяемых ими кластеров определяется выбранной метрикой. На практике это зачастую приводит к явным ошибкам кластеризации и/или чрезмерной раздробленности выделенных кластеров. Кроме того, методы разбиений не способны рассмотреть все возможные разбиения и есть вероятность обнаружения локального, а не глобального экстремума целевой функции. Для нахождения глобального экстремума целевой функции необходимо рассмотреть $S(N, M)$ возможных разбиений исходной выборки на кластеры, где

$$S(N, M) = \frac{1}{M!} \sum_{i=1}^M (-1)^{(M-i)} \binom{M}{i} i^N.$$

Это одно из чисел Стирлинга второго рода, с ростом N оно очень быстро становится огромным.

Одним из первых методов разбиений является алгоритм k -средних (k -means) [23]. Его реализации включены практически во все пакеты программ, предназначенные для анализа спутниковых изображений. Алгоритм позволяет разбить исходную выборку на M кластеров (M – параметр, задаваемый пользователем). Полученные кластеры описываются векторами средних значений (центроидами). В процессе разбиения выполняется итеративная минимизация внутриклассовых расстояний. Соответствующая целевая функция выглядит следующим образом:

$$\sum_{j=1}^M \sum_{x^{(i)} \in C^{(j)}} ||x^{(i)} - c^{(j)}||^2 \rightarrow \min,$$

где $c^{(j)}$ – центроид кластера $C^{(j)}$.

Вычислительная сложность алгоритма k -средних невысока (порядка $O(dMN)$), но он обладает несколькими недостатками. Несмотря на доказанную в [51] сходимость итеративного процесса, он не гарантирует нахождение глобального минимума целевой функции (оптимального разбиения). Поэтому для получения хорошего разбиения необходимо выбрать осмысленные начальные центроиды. Существуют эффективные методы выбора стартовых центроидов, гарантирующие получение качественных результатов кластеризации, но универсального эффективного метода нахождения оптимальных центроидов, не зависящего от структуры данных и специфики решаемой задачи, не может существовать даже теоретически [58]. Кроме того, алгоритм k -средних не способен выделять кластеры разной структуры. Для устранения этого недостатка в [45] предлагается разбивать исходную выборку на сферические кластеры, которые впоследствии используются для построения итогового разбиения.

Ещё одним серьёзным недостатком алгоритма k -средних является необходимость задания числа классов, которое на практике чаще всего неизвестно и не существует эффективных методов его нахождения. Разработано несколько эвристических методов оценивания числа кластеров. Например, в алгоритме ISODATA [5] (наиболее распространённой модификации k -средних) число кластеров может изменяться

за счёт разбиения или объединения уже найденных в соответствии со значениями настраиваемых параметров. В итоге задача определения числа классов сводится к настройке параметров алгоритма. Критерием разбиения служит диаметр кластера, а критерием объединения – расстояние между центроидами соседних кластеров. Алгоритм является итеративным, число кластеров, полученное на предыдущей итерации, используется как стартовое для инициализации последующей.

Помимо перечисленных недостатков, алгоритм k -средних чувствителен к выбросам в данных и «шуму», т. к. при вычислении центроида используются все точки кластера. В алгоритме ISODATA кластеры со слишком большим диаметром (содержащие выбросы) в процессе обработки разбиваются, поэтому выбросы образуют в данных отдельные кластеры. После этого кластеры, содержащие малое число точек, исключаются из рассмотрения. Поэтому алгоритм ISODATA не чувствителен к выбросам в данных. Реализации метода ISODATA включены во многие пакеты программ, предназначенные для обработки спутниковых изображений, поэтому исследователи часто используют его для решения практических задач. Однако для его применения требуется кропотливая настройка входных параметров.

Алгоритм FOREL [72], как и алгоритм k -средних, позволяет минимизировать внутриклассовые расстояния, но в соответствии с ним на каждой итерации выделяется по одному кластеру. Для обнаружения кластера центр сферы фиксированного радиуса помещается в произвольную точку выборки. После этого центр итеративно перемещается в центр масс точек выборки, попавших в сферу, до достижения устойчивого состояния. Затем точки, попавшие в сферу, относятся в один кластер и исключаются из дальнейшего рассмотрения. Процедура выделения кластеров повторяется, пока выборка содержит точки, не исключённые из рассмотрения. Радиус сферы определяется итеративно, в зависимости от требуемого числа кластеров. Такой метод позволяет выделять кластеры сферической формы. Результаты выполнения алгоритма FOREL зависят от выбора начальных центров. Для устранения этого недостатка в [68] описано несколько его модификаций. В алгоритме SKAT предлагается точки, отнесённые к кластерам, не исключать из рассмотрения. Это позволяет выделить кластеры, которые при выделении с использованием всех точек выборки сливаются с другими, и получать устойчивое разбиение. Алгоритм KOLAPS позволяет выделять сферические кластеры разного размера в присутствии «шума». В соответствии с ним кластер, содержащий малое число точек, выбрасывается из рассмотрения на последующих итерациях, но его точки помечаются как шумовые. Кроме того, на завершающем этапе алгоритма для каждого выделенного кластера, начиная с кластера с наибольшим количеством точек, ищется оптимальный радиус сферы, а захваченные ранее шумовые точки относятся к «шуму». Алгоритмы класса FOREL обладают высокой трудоёмкостью для применения непосредственно к спутниковым изображениям и не позволяют выделять кластеры сложной структуры.

В отличие от k -средних, в алгоритме k -представителей (k -medoids) для описания кластеров используются объекты, взятые из исходной выборки (представители). Кластеры формируются путём отнесения каждой точки выборки к ближайшему представителю. Алгоритм k -представителей в наиболее общем виде описан в [35]. Он характеризуется высокой вычислительной сложностью (порядка $O(MN^2)$). Для обработки больших объёмов данных предложено несколько модификаций этого алгоритма [35, 44], в которых алгоритм k -представителей применяется к случайной выборке небольшого объёма (представителям), взятой из множества X . После этого каждый элемент исходной выборки относится к ближайшему представителю. Это позволяет существенно повысить производительность алгоритма, но при малом числе представителей некоторые кластеры могут быть упущены.

К общим недостаткам методов разбиений можно отнести необходимость задания числа кластеров и сильную зависимость результата от значений настраиваемых параметров. Кроме того, они (за исключением алгоритма, предложенного в [45]) не способны выделять кластеры разной структуры (размер, форма и плотность выделяемых кластеров сильно зависят от используемой метрики). Несмотря на это, методы разбиений могут быть эффективно использованы в качестве отдельных этапов многоэтапных процедур сегментации спутниковых изображений.

4. Плотностные методы

Плотностные методы (density-based methods) рассматривают исходную непомеченную выборку как набор реализаций некоторого случайного вектора x . Они разбивают объекты на кластеры на основе оценки плотности распределения x . В данном случае под кластером понимается связанная плотная область в пространстве признаков. Такое определение позволяет выделять кластеры сложной формы и кластеры разного размера. Однако применение плотностных алгоритмов для обработки спутниковых изображений затруднено ввиду их неприемлемо высокой трудоёмкости.

В зависимости от типа используемых оценок, плотностные алгоритмы подразделяются на параметрические (parametric, model-based), и непараметрические (nonparametric).

При параметрическом подходе предполагается, что распределение вектора x описывается заранее определённой вероятностной моделью с фиксированным набором настраиваемых параметров. Параметрические методы рассматривают плотность распределения вектора x как смесь M независимых плотностей

(обычно гауссовских) с неизвестными параметрами. В этом случае задачу кластеризации можно решать как задачу разделения смеси: 1) с помощью алгоритма ЕМ [56] оценить параметры моделей по непомеченным данным; 2) используя полученные параметры, построить разбиение изображения по методу максимального правдоподобия.

Несмотря на все преимущества (слабая чувствительность к «шуму» и выбросам, независимость результата кластеризации от порядка ввода данных, способность выделять кластеры разной структуры и др.), алгоритмы, разработанные в рамках параметрического подхода, обладают существенным недостатком – для их применения необходимо наличие априорных сведений о параметрической структуре данных и количестве классов. При анализе спутниковых изображений такого рода информация практически всегда отсутствует или её получение связано со значительными затратами. Кроме того, параметрические алгоритмы характеризуются высокой вычислительной сложностью.

Оценки, используемые непараметрическими алгоритмами, строятся на основе анализа исходных данных и накладывают слабые ограничения (непрерывность, ограниченность и т. п.) на вид плотности распределения. Благодаря этому непараметрические алгоритмы могут выделять кластеры сложной структуры. Однако для вычисления непараметрической оценки плотности распределения в произвольной точке пространства признаков необходимо учесть вклад каждой точки исходной выборки, поэтому применение плотностных алгоритмов «напрямую» для обработки спутниковых изображений приводит к неприемлемым вычислительным затратам.

Наиболее распространенными непараметрическими оценками плотности распределения являются гистограммная оценка (histogram estimation), оценка k -ближайших соседей (k -nearest neighbors estimation, k -NN estimation) и оценка плотности Розенблатта – Парзена (Parzen density estimation).

Для получения гистограммной оценки координатные оси пространства признаков разбиваются на интервалы, как правило, одинаковой длины (на основании этого пространство признаков разбивается на ячейки), и подсчитываются частоты попадания значений векторов-признаков в полученные ячейки. При определенных условиях на оценку плотности распределения, гистограммная оценка является состоятельной.

Один из наиболее распространённых алгоритмов на основе гистограммной оценки плотности предложен в [43]. В соответствии с ним, после квантования пространства признаков выполняется построение гистограммной оценки плотности с последующим выделением кластеров. Алгоритм позволяет выделять кластеры сложной формы и разного размера, характеризующиеся одномодальным распределением, даже в присутствии «шума». В [77] предложена многоуровневая иерархическая процедура на основе этого метода, позволяющая выделять кластеры с многомодальным распределением.

В основе оценки k -ближайших соседей лежит предположение, что вероятность принадлежности двух элементов выборки одному классу обратно пропорциональна расстоянию между ними («подобное – к подобному»). При использовании этой оценки непомеченный элемент выборки относится к тому же кластеру, что и большинство из k -ближайших к нему помеченных элементов. Оценка k -ближайших соседей в чистом виде чувствительна к «шуму», поэтому расстояние, на котором соседние элементы влияют друг на друга, часто ограничивают пороговым значением. Эта оценка является состоятельной, но смещённой.

Оценка плотности Розенблатта – Парзена складывается из вкладов всех элементов выборки. Вклад каждого вектора-признака описывается функцией-ядром $\Phi(x)$. Формула для вычисления оценки плотности $\hat{f}_N(x, \Phi)$ в произвольной точке пространства признаков имеет следующий вид:

$$\hat{f}_N(x, \Phi) = \frac{1}{Nh^k} \sum_{i=1}^N \Phi\left(\frac{x - x^{(i)}}{h}\right),$$

где $\Phi(x)$ – колоколообразная функция (ядро), удовлетворяющая условиям [79]:

- 1) $\Phi(x) \geq 0 \quad \forall x \in R^k$,
- 2) $\sup_{x \in R^k} \Phi(x) < \infty$,
- 3) $\int_{R^k} \Phi(x) dx = 1$, 4) $\lim_{\|x\| \rightarrow \infty} \|x\|^k \Phi(x) = 0$.

Эти условия необходимы для того, чтобы оценка плотности Розенблатта – Парзена являлась несмещённой и состоятельной.

Одним из вычислительно эффективных алгоритмов, созданных в рамках непараметрического подхода, является DBSCAN [22]. Для построения оценки плотности, на основе соседства точек вводятся понятия достижимости и связности. Под ε -соседями точки $x \in X$ понимается множество точек, расстояние до

которых не превышает ε , т. е. $N_\varepsilon(x) = \{y \in X \mid D(x, y) \leq \varepsilon\}$. Тогда точка y достижима из точки x , если существует последовательность точек $x^{(1)} = x, x^{(2)}, \dots, x^{(p-1)}, x^{(p)} = y$, для которой выполнено:

$$\begin{aligned} x^{(i+1)} &\in N_\varepsilon(x^{(i)}), \quad i = 1, \dots, p-1; \\ |N_\varepsilon(x^{(i)})| &\geq MinPts, \quad i = 1, \dots, p-1. \end{aligned}$$

Здесь значение $MinPts$ задаётся пользователем и регулирует порог «шума». Согласно второму условию, у точек, находящихся внутри кластера, должно быть не менее $MinPts$ ε -соседей. Такие точки называются «ядрами». Остальные точки разделяются на граничные (имеющие менее $MinPts$ ε -соседей, но достижимые из какого-либо «ядра») и шумовые. Две точки связны, если существует «ядро», из которого они обе достижимы.

При такой постановке задачи, под кластером понимается максимальное связанное подмножество множества X . Точки, не попавшие в какой-либо кластер (не принадлежащие ε -окрестности какого-либо «ядра»), относятся к классу «шум».

К настоящему времени разработано достаточно много модификаций алгоритма *DBSCAN*. В [60] предложена параллельная версия алгоритма для высокопроизводительных вычислительных систем, а в [21] – способ потоковой обработки новых данных.

Для работы *DBSCAN* требуется два параметра, оптимальные значения которых определить достаточно сложно. Поэтому в [4] предложен алгоритм *OPTICS*, позволяющий упорядочить исходное множество и упростить процесс кластеризации. В соответствии с ним строится диаграмма достижимости, благодаря которой появляется возможность при фиксированном значении $MinPts$ обработать не только заданное значение ε , но и все $\varepsilon^* < \varepsilon$.

Для упорядочивания множества X для каждого его элемента вычисляется два параметра – «ядерное расстояние» (core distance, CD) и наименьшее из «расстояний достижимости» (reachability distance, RD):

$$\begin{aligned} CD(x) &= \begin{cases} +\infty, & \text{если } |N_\varepsilon(x)| < MinPts, \\ MinPts_dist(x), & \text{иначе;} \end{cases} \\ RD(x, y) &= \begin{cases} +\infty, & \text{если } |N_\varepsilon(y)| < MinPts, \\ \max\{CD(y), D(x, y)\}, & \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь $MinPts_dist(x)$ – расстояние от точки x до её $MinPts$ -го соседа.

Проще говоря, «ядерное расстояние» – это наименьшее значение ε^* , при котором x является «ядром», а «расстояние достижимости» – значение ε^* , при котором x становится напрямую достижима из y . Соответственно, наименьшее из «расстояний достижимости» для x – это значение ε^* , при котором x становится достижимой хотя бы из одного «ядра» (перестает быть шумовой). В зависимости от комбинации этих параметров, при фиксированном значении ε^* точка x может быть как внутренней ($CD(x) \leq \varepsilon^*$), так и граничной ($CD(x) > \varepsilon^*$, $RD(x) \leq \varepsilon^*$) точкой кластера, а также являться шумовой ($CD(x) > \varepsilon^*$, $RD(x) > \varepsilon^*$).

Благодаря сортировке с помощью дополнительных полей, классификация выборки алгоритмом *DBSCAN* с параметрами $\varepsilon^* \leq \varepsilon$, $MinPts$ сводится к последовательному перебору упорядоченной выборки и присвоению каждому её элементу номера соответствующего класса («обрезанию» диаграммы достижимости на нужном уровне и выделению на ней кластеров).

Экспериментально установлено [4], что *OPTICS* работает примерно в 1.6 раза медленнее, чем *DBSCAN*. Для работы алгоритма *OPTICS* (как и *DBSCAN*) требуется два параметра – ε и $MinPts$. На данный момент предложено множество его модификаций (в том числе потоковая версия [36], позволяющая быстро пересчитывать кластеры при появлении новых точек), а также параллельная версия для обработки данных на многопроцессорных вычислительных системах [10].

Результат работы *OPTICS* зависит от параметра ε гораздо слабее, чем результат *DBSCAN*. Однако при слишком маленьком ε структура классов может остаться незамеченной (вплоть до отнесения всей выборки в класс «шум»), а при слишком большом вычислительная сложность алгоритма становится неприемлемо высокой. Для решения этой проблемы в [1] предложен алгоритм *DeLiChu*, в соответствии с которым

точки исходной выборки добавляются в диаграмму достижимости последовательно. Для добавляемой точки при помощи методов вычислительной геометрии ищется $MinPts$ ближайших соседей и вычисляется расстояние достижимости. Благодаря этому, для работы алгоритма *DeLiClu* необходим всего один параметр ($MinPts$). Основным достоинством алгоритма является то, что он при заданном значении $MinPts$ позволяет полностью восстановить иерархическую структуру кластеров.

На основе *DBSCAN* разработан проекционный алгоритм *SUBCLU* [37]. Он опирается на предположение, что кластер, существующий в пространстве определённой размерности, существует и во всех его подпространствах. Основная идея алгоритма заключается в применении *DBSCAN* к проекциям исходной выборки на подпространства исходного пространства признаков. Алгоритм *SUBCLU* позволяет выделить в подпространстве кластеры, которые выделил бы *DBSCAN*, применённый напрямую к этому подпространству. При этом *SUBCLU* обладает высокой производительностью.

В [17] предложен комбинированный трёхэтапный алгоритм *BRIDGE*. В соответствии с ним, сначала выборка разбивается на кластеры при помощи k -средних (или *BIRCH*). Затем для выделения в каждом кластере «шума» используется *DBSCAN*, а на последнем этапе снова применяет k -средних к выборке уже без «шума». Такая схема позволяет сгладить некоторые недостатки обоих алгоритмов.

В алгоритм *GDILC* [62], как и в *DBSCAN*, плотность оценивается на основе соседства точек. Для этого с использованием сеточной структуры строятся изолинии плотности, по которым выделяются кластеры (области, окружённые изолиниями определённого уровня). Недостатком алгоритма *GDILC* является то, что он применим только к данным низкой размерности. В [65] предложен алгоритм *AGRID*, являющийся модификацией *GDILC* для обработки многомерных данных. Для оценивания плотности в точке в *AGRID* используются не только точки, попавшие в соответствующую ячейку, но и точки из соседних с ней ячеек (соседними являются ячейки, имеющие общую границу размерности $k - 1$). С ростом размерности число ячеек растёт экспоненциально, поэтому в [64] предлагается разбивать первые несколько размерностей на большее число интервалов, а все остальные – на меньшее (алгоритм *AGRID+*). Если упорядочить признаки в соответствии со снижением информативности, то можно регулировать итоговое число ячеек без значительного снижения качества кластеризации. В дополнение к этому, для получения более точной оценки плотности в точке x вводится степень соседства ячеек, зависящая от размерности общей границы с клеткой, содержащей x . Для оценивания плотности используются все соседние клетки, причём вклад точек, попавших в них, прямо пропорционален степени соседства клеток.

Альтернативный подход к оцениванию плотности и основанный на нём алгоритм *DBCLASD* предложен в [61]. Используя предположение, что расстояния между точками внутри кластера подчиняются равномерному распределению, кластер в *DBCLASD* определяется как максимальное непустое подмножество множества X , имеющее равномерное распределение расстояний до ближайших соседей (с некоторым порогом доверия). Для определения равномерности распределения используется критерий χ^2 . Граница кластера описывается полигоном, построенным с использованием сеточного подхода.

Элементы выборки обрабатываются последовательно, поэтому результаты кластеризации зависят от порядка входных данных. Для устранения этого недостатка предложены две модификации: 1) точки могут быть перемещены из одного кластера в другой в процессе обработки, 2) точки, отнесённые к «шуму», рассматриваются повторно после формирования кластеров.

К преимуществам алгоритма относится то, что он не требует входных параметров и позволяет выделять кластеры сложной структуры, к недостаткам – зависимость результатов обработки от порядка ввода данных.

В алгоритме *DENCLUE* [30] используется оценка плотности Розенблатта – Парзена с гауссовским ядром:

$$\Phi_G(x, x^{(i)}) = \exp\left(-\frac{\|x - x^{(i)}\|^2}{2h^2}\right).$$

После построения оценки плотности точки, в которых достигаются её локальные максимумы, находят с помощью процедуры «среднего сдвига», предложенной в [25] и использованной для сегментации изображений в [14]. Процедурой «среднего сдвига» называются повторяющиеся движения от точки $x_0 = x \in R^k$ к $x_1 = m_h(x_0, \Phi)$, затем от x_1 к $m_h(x_1, \Phi)$ и т.д. до шага l , на котором $x_l = m_h(x_l, \Phi)$.

Вектор $m_h(x, \Phi) = \frac{\sum_{i=1}^N x^{(i)} \Phi'(x, x^{(i)})}{\sum_{i=1}^N \Phi'(x, x^{(i)})} - x$ называется вектором «среднего сдвига». Его направление в точке

ке x совпадает с градиентом оценки плотности $\hat{f}_N(x, \Phi)$ (направлением максимального роста плотности в этой точке).

Точка x называется «точкой притяжения» для y , если процедура «среднего сдвига», стартовавшая из y , сходится в x . При таком подходе одномодовый кластер C задаётся локальным максимумом x_C и является множеством точек, для которых x_C является «точкой притяжения». Если плотность в x_C меньше заданного порога ξ , то кластер C относится к «шуму».

В соответствии с алгоритмом *DENCLUE*, пространство признаков перед кластеризацией разбивается на гиперкубические ячейки со стороной 2^h (параметр h задаётся пользователем). Это позволяет считать *DENCLUE* сеточным алгоритмом. Процедура «среднего сдвига» стартует только из точек, попавших в плотные (содержащие более ξ точек исходной выборки) и соседние с ними ячейки. Благодаря этому *DENCLUE* позволяет обрабатывать данные, содержащие «шум» и выбросы. Кроме того, он позволяет выделять кластеры разной структуры.

Процедура «среднего сдвига» является слишком трудоёмкой для кластеризации спутниковых изображений, поэтому было разработано несколько её оптимизаций. В [13] предлагается использовать ядро Епанечникова [71], что позволяет значительно упростить вычисление вектора «среднего сдвига». Кроме того, авторы предлагают использовать для запуска процедуры не все точки выборки, попавшие в области с высокой плотностью, а набор представителей. В работе [24] описан метод, использующий для построения оценки плотности небольшое подмножество исходного множества, что позволяет многократно сократить время обработки. В [74] предлагается использовать сеточную структуру в пространстве признаков для быстрого вычисления оценки плотности распределения.

Альтернативой уменьшению выборки может служить уменьшение необходимого числа итераций «среднего сдвига». Для этого используется либо адаптивная подстройка параметра h под структуру данных [15, 55], либо взвешенный вектор «среднего сдвига» [38].

Непараметрические алгоритмы строят разбиение на основе анализа исходных данных и не накладывают ограничений на структуру кластеров. Поэтому они позволяют выделять кластеры разной структуры при наличии «шума» и выбросов. Единственным серьёзным недостатком непараметрических алгоритмов является высокая вычислительная сложность. Кроме того, кластеры, выделяемые алгоритмом «среднего сдвига», характеризуются излишней раздробленностью.

5. Сеточные методы

Сеточные методы (grid-based methods) основаны на введении сеточной структуры в пространстве признаков. Отличительной особенностью алгоритмов, относящихся к этой группе, является переход от обработки отдельных элементов выборки к обработке элементов сеточной структуры. В общем виде схема работы сеточного алгоритма кластеризации выглядит следующим образом [7].

Шаг 1. Построить разбиение пространства признаков на ячейки (размер ячейки, зачастую, является параметром алгоритма).

Шаг 2. Разбить ячейки на кластеры.

Шаг 3. Разбить исходную выборку на кластеры на основе кластеризации ячеек.

Результат выполнения сеточных алгоритмов не зависит от порядка ввода данных. При низкой вычислительной сложности (порядка $O(N) \dots O(N \log N)$), они позволяют выделять кластеры сложной структуры. К недостаткам сеточных алгоритмов можно отнести то, что качество выделяемых кластеров сильно зависит от размера ячеек. Выбор размера и способа построения сетки – достаточно сложная задача (часто размер сетки является параметром алгоритма). При слишком большом размере или неудачном расположении клеток происходит искусственное огрубление границ кластеров, а в случае близких классов даже их объединение. Это может привести к грубым ошибкам кластеризации. При измельчении клеток происходит незначительное улучшение результата за счёт серьёзного роста времени обработки. Кроме того, слишком мелкие клетки часто приводят к чрезмерному измельчению кластеров.

Во многих сеточных алгоритмах в процессе классификации считается количество элементов исходной выборки, попавших в ячейку. Это значение используется для уменьшения объёма вычислений за счёт отсечения пустых (или практически пустых) клеток, а в некоторых алгоритмах и при объединении кластеров. Это позволяет считать некоторые сеточные алгоритмы плотностными (с гистограммной оценкой плотности распределения). Если при выполнении алгоритма плотности в ячейках сравниваются не только

с пороговым значением, но и между собой, то будем считать, что алгоритм разработан в рамках комбинации плотностного и сеточного подходов.

Классическим примером сеточного алгоритма с фиксированной сеткой является *STING* [57]. Алгоритм разрабатывался для выполнения пространственных запросов к базам данных, но с его помощью можно осуществлять кластеризацию спутниковых снимков. В соответствии с алгоритмом *STING* в пространстве признаков вводится иерархическая сеточная структура. Построение сеточной структуры начинается с одной ячейки (содержащей всю исходную выборку), которая впоследствии разбивается на несколько более мелких (по умолчанию, четыре). Каждая ячейка описывается различными параметрами, как зависящими (вектор средних значений; дисперсия; минимальные и максимальные значения признаков; метка статистического распределения – «нормальное», «равномерное» или «отсутствует»), так и не зависящими от значений переменных (число попавших в клетку векторов). Параметры родительских ячеек могут быть вычислены только если известны параметры всех дочерних.

Кластеризация выполняется от корня дерева (или какого-то среднего уровня иерархии) вплоть до листьев. На каждом уровне дерева определяются ячейки, точки в которых подчиняются одному из законов распределения; на последующих уровнях рассматриваются только их потомки. После рассмотрения всех ячеек кластеры, плотность которых выше заданного порога, выделяются методом поиска в ширину.

Алгоритм *STING* обладает низкой вычислительной сложностью (порядка $O(N)$) и способен одновременно выделять кластеры разной структуры. Результат его выполнения не чувствителен к «шуму» (клетки с низкой плотностью в процессе обработки будут автоматически отнесены к «шуму») и не зависит от порядка ввода данных. Недостатком алгоритма является то, что границы выделяемых кластеров сильно зависят от размера сетки и зачастую являются грубыми.

В алгоритме *WaveCluster* [52] изображение в пространстве признаков со введённой сеточной структурой рассматривается как цифровой сигнал (значением сигнала в ячейке сетки является количество точек, попавших в эту ячейку). При таком подходе граница кластера, на которой меняется распределение данных, соответствует высокочастотной части сигнала, а внутренняя область кластера – низкочастотному сигналу с высокой амплитудой. Тогда для выделения кластеров могут быть использованы технологии обработки сигналов, например вейвлет-преобразование, позволяющее устранить «шум» и разделить части сигнала с различными частотами. При этом качество классификации можно регулировать количеством повторных вейвлет-преобразований пространства.

Алгоритм *WaveCluster* способен выделять кластеры сложной структуры, нечувствителен к «шуму» и выбросам и не требует задания числа кластеров. Результаты выполнения алгоритма не зависят от порядка ввода данных. Кроме того он обладает низкой вычислительной сложностью (порядка $O(N)$) и позволяет обнаружить иерархическую вложенность кластеров.

В алгоритме *FC* [6] предлагается ввести в пространстве признаков серию сеток разного масштаба, каждая последующая вдвое мельче предыдущей. Полученную сеточную структуру можно рассматривать как фрактал и вычислять для неё фрактальную размерность. На первом этапе кластеризации при помощи алгоритма «ближайший сосед» генерируется начальное разбиение. Основная идея второго этапа заключается в пошаговом распределении точек по исходным кластерам так, чтобы фрактальные размерности кластеров оставались неизменными. После рассмотрения всей выборки кластеры с маленькой фрактальной размерностью объединяются в класс «шум».

Алгоритм *FC* обладает низкой трудоёмкостью (порядка $O(N)$) и нечувствителен к «шуму» и выбросам. Однако результат его выполнения сильно зависит от начального разбиения и порядка ввода данных.

Жёсткая зависимость границ выделяемых кластеров от размера ячеек является общим недостатком всех алгоритмов, использующих фиксированную сетку. Существует несколько путей его устранения. В [11] предложен алгоритм *ASGC*, в котором введённая сеточная структура после кластеризации сдвигается на половину размера ячейки в каждом направлении, после чего процесс кластеризации повторяется. Совместный анализ полученных разбиений позволяет повысить точность выделения границ кластеров.

В [53] предлагается алгоритм, в котором при анализе учитываются характеристики не только рассматриваемой, но и соседних с ней клеток. Это позволяет предварительно «сжать» плотные области пространства признаков (в предлагаемом алгоритме используется гистограммная оценка плотности распределения) и повысить разделимость кластеров. Для «сжатия» данных используется метод, аналогичный закону всемирного тяготения. Кроме того, вместо одной сетки алгоритм использует последовательность фиксированных сеток различного масштаба (подобно алгоритму *FC*), среди которых выбираются сетки, наиболее подходящие для обрабатываемых данных. После выполнения кластеризации на каждой из отобранных сеток, среди результатов выбирается наилучший с точки зрения введённого критерия компактности кластеров. Описанный подход является слишком трудоёмким для применения непосредственно к многоспектральным изображениям, но его можно комбинировать с другими методами для повышения качества результатов обработки.

В [39] для построения гистограммной оценки плотности предлагается использовать не только точки, попавшие в ячейку, но и ближайшие точки соседних клеток. Предлагаемый алгоритм не позволяет выде-

лять кластеры в присутствии «шума» и выбросов, но позволяет снизить их влияние на результат за счёт искусственного повышения контраста между плотными и неплотными клетками.

Для работы в многомерном пространстве признаков в рамках сеточного подхода были разработаны алгоритм *CLIQUE* [2] и его незначительная модификация *ENCLUS* [12]. В основе *CLIQUE* лежит наблюдение, что кластер, существующий в пространстве определённой размерности, гарантированно существует во всех его подпространствах меньшей размерности. Поэтому алгоритм сначала выделяет плотные интервалы (кластеры) во всех одномерных проекциях, затем формирует из них кластеры более высоких размерностей. С ростом размерности кластеры, найденные на предыдущих итерациях, перестают быть плотными областями и отсекаются (*ENCLUS* отличается от *CLIQUE* только критерием отсека). Здесь под кластером понимается максимальное множество связанных плотных ячеек в пространстве признаков. Если рассматривать множество плотных ячеек в подпространстве как граф (ячейки-вершины связаны ребром, если они имеют общую границу), то поиск кластеров аналогичен процессу выделения связанных подграфов.

Альтернативным путём устранения этого недостатка является использование адаптивной сетки (adaptive grid), т. е. разбиение пространства признаков на ячейки на основе анализа исходных данных. Типичным представителем алгоритмов с адаптивной сеткой является *GRIDCLUS* [50]. В соответствии с ним пространство признаков разбивается на ячейки в зависимости от распределения исходных данных. Затем для каждой ячейки вычисляется относительная плотность. Формирование кластеров начинается с центров (более плотных ячеек), к которым постепенно присоединяются менее плотные, имеющие с ними общую границу. К достоинствам алгоритма *GRIDCLUS* можно отнести возможность обработки больших объёмов многомерных данных и высокое быстродействие, а также возможность выделять заранее неизвестное число кластеров, в том числе вложенных. К недостаткам – чувствительность к «шуму» и неспособность выделять кластеры сложной формы.

В алгоритме *GCHL* [47] используется сеточная структура из ячеек одинакового размера, которая вводится по мере ввода данных. При появлении объекта, не попадающего ни в одну из существующих ячеек, образуется новая ячейка. Ячейки построенной таким способом сеточной структуры могут получиться достаточно сложной формы, т. к. область пересечения и лежащие в ней элементы исходной выборки относятся к ячейке, введённой раньше других.

После введения сеточной структуры вычисляется относительная плотность каждой ячейки (отношение количества попавших в ячейку объектов исходной выборки к её относительному объёму). Если относительная плотность не превышает заданный порог, ячейка удаляется, а попавшие в неё точки считаются шумовыми. Затем из оставшихся ячеек строятся кластеры по той же схеме, что и в *GRIDCLUS*.

К достоинствам алгоритма *GCHL* можно отнести невысокую трудоёмкость и возможность обработки больших массивов многомерных данных. Кроме того, алгоритм нечувствителен к «шуму» и позволяет выделять кластеры сложной формы. Основным его недостатком заключается в том, что результат кластеризации зависит от порядка ввода данных.

В алгоритме *MAFIA* [41], в отличие от *CLIQUE*, вместо фиксированной сетки используется адаптивная. Это позволяет уменьшить число параметров алгоритма и повысить точность выделения границ кластеров. Ещё одно значительное отличие алгоритма *MAFIA* от *CLIQUE* заключается в том, что при выделении кластеров в подпространстве учитывается плотность ячеек. Эта особенность позволяет считать *MAFIA* как сеточным, так и плотностным алгоритмом (с гистограммной оценкой плотности распределения). В [27, 42] предложена схема параллельной реализации алгоритма *MAFIA* для выполнения его на высокопроизводительных вычислительных системах.

Переход от попиксельной обработки к анализу элементов сеточной структуры позволяет значительно снизить трудоёмкость алгоритма. Сеточные алгоритмы позволяют получить качественные результаты, но для этого необходима длительная и нетривиальная настройка параметров. Неправильный выбор параметров алгоритма зачастую приводит к снижению качества результата, особенно при необходимости точного разделения кластеров. Предложено несколько способов устранения этого недостатка за счёт применения различных модификаций при формировании сетки (адаптивная сетка, подвижная сетка и др.) или одновременного использования нескольких сеток, но все они приводят к снижению производительности.

6. Нейронные сети

Нейронные сети [80] эмулируют поведение нейронов коры головного мозга человека при анализе данных. Нейросетевой алгоритм представляет собой одно- или многослойную сеть, каждый слой которой состоит из множества вычислительных узлов (нейронов). У нейрона есть несколько входных связей (синапсов), каждая со своим весом w_{ij} , по которым он принимает поступающие сигналы. В зависимости от взвешенной суммы поступивших сигналов и заданной функции активации, нейрон может возбудиться и передать на выходную связь (аксон) соответствующий сигнал.

Для классификации без учителя применяются нейронные сети специального вида (называемые сетями Кохонена). Сеть Кохонена состоит из одного слоя нейронов. Число синапсов каждого нейрона равно ко-

личеству переменных k , количество нейронов совпадает с требуемым числом кластеров M (меняя количество нейронов можно регулировать число кластеров в процессе обучения).

Обучение сети Кохонена начинается с задания небольших случайных значений весовой матрицы. В дальнейшем происходит модификация весов при подаче на вход векторов исходной выборки (процесс самоорганизации сети). Для элемента $x \in X$ находится ближайший к нему нейрон с номером l , называемый победителем:

$$l = \operatorname{argmin}_i \sum_{j=1}^d (x_j - w_{ij})^2.$$

Это означает, вектор x отнесён к кластеру C_l и на текущем шаге обучения будут изменяться только веса нейрона-победителя с номером l (принцип «победитель забирает всё»).

В более сложных сетях Кохонена (самоорганизующихся картах [19]) при обучении изменяются веса всех нейронов из окрестности победителя. В этом случае темп обучения нейронов обратно пропорционален расстоянию до победителя. Первоначально в окрестности каждого нейрона находятся все нейроны сети, но с каждым шагом обучения окрестность сужается. В конце этапа обучения изменяются только веса победителя.

Характерной особенностью всех нейросетевых алгоритмов является последовательная обработка точек исходной выборки, поэтому результат их выполнения зависит от порядка ввода данных. Кроме того, для запуска любого нейросетевого алгоритма кластеризации необходимо задание числа кластеров, что нежелательно при обработке спутниковых снимков.

Заключение

В таблице представлены характеристики рассмотренных в настоящем обзоре алгоритмов.

Учитывая перечисленные во введении особенности задачи кластеризации спутниковых данных, ни один из известных подходов не позволяет создать универсальный алгоритм. Возможными выходами из этой ситуации являются: 1) разработка алгоритмов в рамках комбинации нескольких подходов, 2) построение многоэтапных процедур, позволяющих на каждом этапе эффективно использовать достоинства отдельных алгоритмов.

Разработка алгоритмов в рамках комбинации нескольких подходов позволяет объединить их достоинства и сгладить недостатки. Например, алгоритмы, разработанные в рамках комбинации плотностного и сеточного подходов (*OPTICS* [4], *DeLiClu* [1], *MeanSC* [74] и др.), характеризуются высокой (для плотностных методов) производительностью и качественным выделением границ кластеров, не свойственным сеточным методам.

Использование алгоритмов, разработанных в рамках разных подходов, для построения многоэтапных процедур позволяет применять каждый алгоритм в оптимальных для его выполнения условиях. Кроме того, такой подход позволяет на финальных этапах улучшить результаты, которые получены вычислительно эффективными алгоритмами на начальных этапах обработки. Примеры такого рода алгоритмов приведены в [17, 46, 77].

Характеристики алгоритмов кластеризации

Название алгоритма	Число настраиваемых параметров	Вычислительная сложность	Возможность обрабатывать большой объём данных	Результат не зависит от порядка ввода данных	Не требуется задание числа кластеров	Возможность выделять кластеры сложной структуры	Возможность выделять кластеры в присутствии «шума» и выбросов	Возможность построить иерархическую структуру кластеров	Число итераций определено заранее
BIRCH	1	$O(N)$	–	–	–	–	–	+	+
CURE	4	$O(N^2 \log N)$	–	+	–	+	+	+	+
k -средних	1	$O(dMN)$ (2)	+	+	–	–	–	–	–
ISODATA	6	$O(dMN)$ (2)	+	+	$\pm$ (3)	–	+	–	+
k -представителей	1	$O(MN^2)$	–	+	–	–	–	–	–
Алгоритм [74]	1	$O(N)$	+	+	+	+	+	+	–
DBSCAN	2	$O(N \log N)$	+	+	+	–	+	–	+
OPTICS	2	$O(N \log N)$	+	+	+	+	+	+	+
DeLiClu	нет	$O(N \log N)$	+	+	+	+	+	+	+
SUBCLU	2	$O(N \log N)$	+	+	+	+	+	–	+
BRIDGE	1	$O(N \log N)$	+	+	–	–	+	–	–
GDILC	2	$O(N)$	+	+	+	+	+	–	+
AGRID	2	$O(N)$	+	+	+	+	+	–	+
AGRID+	2	$O(dN)$	+	+	+	+	+	–	+
DBCLASD	нет	$1.5-3 \times DBSCAN$	+	–	+	+	+	–	+
DENCLUE	2	$O(N \log N)$	+	–	+	+	+	–	+
Алгоритм [24]	2	$O(\tilde{N}^2)$ (5)	+	+	+	+	+	–	+
STING	нет	$O(N)$	+	+	+	+	+	–	+
WaveCluster	нет	$O(N)$ при малом M	+	+	+	+	+	–	+
FC	2	$O(N)$	+	–	+	+	+	–	+
ASGC	3	$O(N + K^d)$ (4)	+	+	+	+	+	–	+
Алгоритм [53]	6	$O(N \log N)$ (2)	–	+	+	+	+	–	+
CLIQUE	2	$O(dN + M^d)$	+	+	+	+	+	–	+
ENCLUS	3	$O(dN)$	+	+	+	+	+	–	+
GRIDCLUS	3	$O(N)$	+	+	+	+	–	+	+
GCHL	2	$O(dN \log N)$	+	–	+	+	+	–	+
MAFIA	2	$O(dN + \text{const}^d)$	+	+	+	+	+	–	+

(1) – в зависимости от сложности алгоритма поиска ближайших соседей,

(2) – вычислительная сложность каждой итерации,

(3) – необходимо задать лишь примерное число кластеров,

(4) – κ – число разбиений пространства по каждой размерности,

(5) – $\tilde{N}$ – объём рабочей выборки.

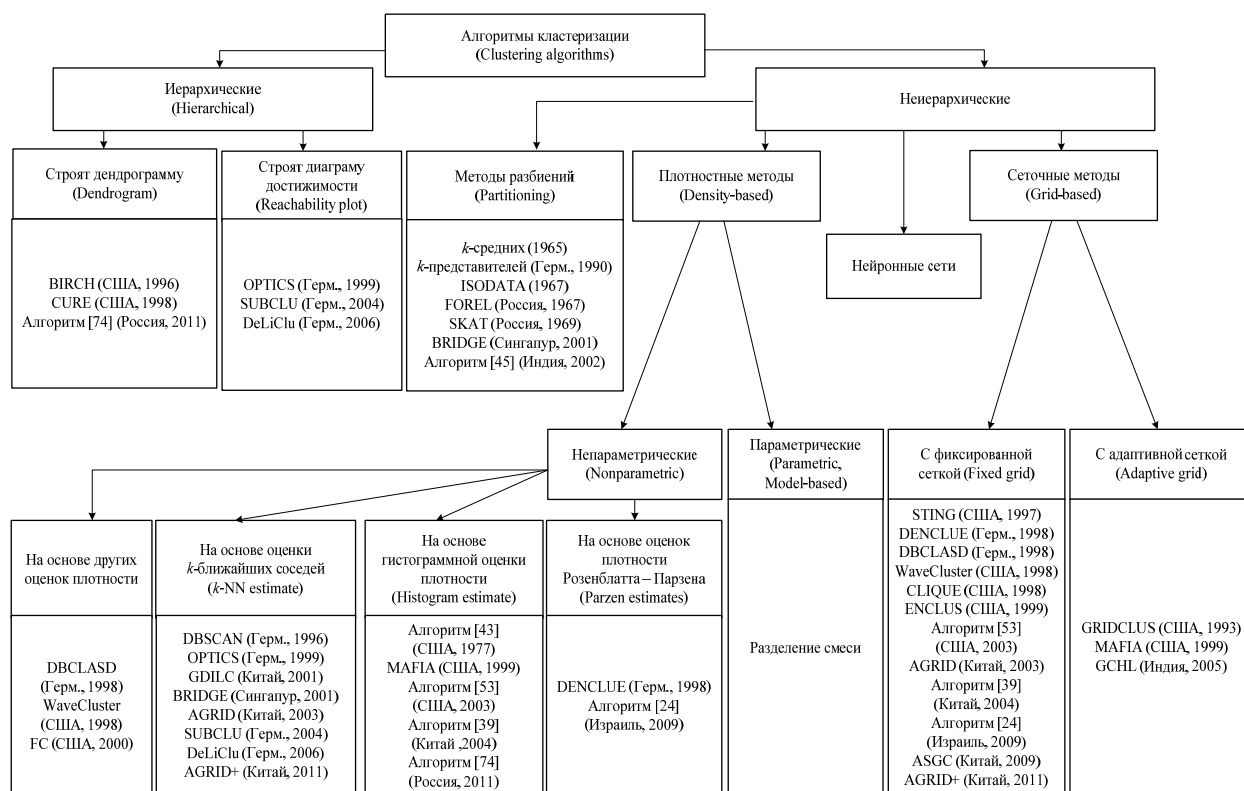


Рис. Группы алгоритмов кластеризации

Литература

1. Achtert, E. DeLiClu: boosting robustness, completeness, usability, and efficiency of hierarchical clustering by a closest pair ranking / E. Achtert, C. Bohm, P. Kroger // Proc. 10th Pacific-Asia Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD'06). – Singapore, 2006. – P. 119 – 128.
2. Agrawal, R. Automatic subspace clustering of high dimensional data for data mining applications / R. Agrawal, J. Gehrke, D. Gunopulos, P. Raghavan // SIGMOD Record ACM Special Interest Group on Management of Data. – 1998. – P. 94 – 105.
3. Anderberg, M. R. Cluster analysis for applications / M. R. Anderberg. – Acad. press, 1973.
4. Ankerst, M. OPTICS: ordering points to identify the clustering structure / M. Ankerst, M. M. Breunig, H.-P. Kriegel, J. Sander // Proc. 1999 ACM SIGMOD Intern. Conf. on Management of data. – 1999. – P. 49 – 60.
5. Ball, G. A clustering technique for summarizing multivariate data / G. Ball, D. Hall // Behavioral Sci. – 1967. – Vol. 12. – P. 153 – 155.
6. Barbara, D. Using the fractal dimension to cluster datasets / D. Barbara, P. Chen // Proc. 6th ACM SIGKDD. – Boston, MA, 2000. – P. 260 – 264.
7. Berkhin, P. Survey of clustering data mining techniques / P. Berkhin // Tech. Rep. – Accrue Software, 2002.
8. Bouguettaya, A. Comparison of group-based and object-based data clustering techniques / A. Bouguettaya, Q. Le Viet, M. Golea // Proc. 8th Intern. Database Workshop Data Mining, Data Warehousing and Client/Server Databases. – Hong Kong, Singapore: Springer-Verlag, 1997. – P. 119 – 136.
9. Brecheisen, S. Density-based data analysis and similarity search / S. Brecheisen, H.-P. Kriegel, P. Kroger et al. // Multimedia Data Mining and Knowledge Discovery. – Springer, 2006. – P. 94 – 115.
10. Brecheisen, S. Parallel density-based clustering of complex objects / S. Brecheisen, H.-P. Kriegel, M. Pfeifle // Proc. 10th Pacific-Asia Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD'06). – Singapore, 2006. – Lect. Notes in Artificial Intelligence. – Springer, 2006. – Vol. 3918. – P. 179 – 188.
11. Chang, C.-I. An axis-shifted grid-clustering algorithm / C.-I. Chang, N. P. Lin, N.-Y. Jan // Tamkang J. of Sci. and Engineering. – 2009. – Vol. 12. № 2. – P. 183 – 192.
12. Cheng, C.-H. Entropy-based subspace clustering for mining numerical data / C.-H. Cheng, A. W. Fu, Y. Zhang // Proc. ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge discovery and data mining. – ACM Press, 1999. – P. 84 – 93.
13. Comaniciu, D. Distribution free decomposition of multivariate data / D. Comaniciu, P. Meer // Patt. Anal. and Appl. – 1999. – V. 2. – P. 22 – 30.

14. Comaiciu, D. Mean shift: a robust approach towards feature space analysis / D. Comaniciu, P. Meer // IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell. – 2002. – V. 24. – № 5. – P. 603 – 619.
15. Comaniciu, D. The variable bandwidth mean shift and data-driven scale selection / D. Comaniciu, V. Ramesh, P. Meer // Proc. Eighth IEEE Intern. Conf. on Comp. Vision. – Vancouver, 2001. – V. 1. – P. 438 – 445.
16. Cutting, D. Scatter/gather: a cluster-based approach to browsing large document collections / D. Cutting, D. Karger, J. Pedersen, J. Tukey // Proc. Fifteenth Annual Intern. ACM SIGIR Conf. on Research and Development in Information Retrieval. – Copenhagen, Denmark, 1992. – P. 318 – 329.
17. Dash, M. '1+1>2': merging distance and density based clustering / M. Dash, H. Liu, X. Xu // Proc. Seventh Intern. Conf. on Database Systems for Advanced Applications. – Hong-Kong: IEEE Computer Society, 2001. – P. 32 – 39.
18. Dey, V. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective / V. Dey, Y. Zhang, M. Zhong // ISPRS TC VII Symp. – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5 – 7, 2010. – IAPRS. – Vol. XXXVIII, pt 7A. – P. 31 – 42.
19. Du, K.-L. Clustering: a neural network approach / K.-L. Du // Neural Networks. – 2010. – Vol. 23. – P. 89 – 107.
20. Duda, R. Pattern classification. 2nd ed. / R. Duda, P. Hart, D. Stork. – N.Y.: John Wiley & Sons, 2001.
21. Incremental clustering for mining in a data warehousing environment / M. Ester, H. Kriegel, J. Sander et al. // Proc. 24th Intern. Conf. on Very Large Data Bases. – N.Y.: Morgan Kaufmann, 1998. – P. 323 – 333.
22. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial database / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // Proc. 1996 Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. – 1996. – P. 226 – 231.
23. Forgy, E. Cluster analysis of multivariate data: efficiency vs. interpretability of classifications / E. Forgy // Biometrics. – 1965. – Vol. 21. – P. 768 – 780.
24. Freedman, D. Fast mean shift by compact density representation / D. Freedman, P. Kisilev // Proc. IEEE Conf. on Comp. Vision and Patt. Recogn. – 2009. – P. 1818 – 1825.
25. Fukunaga, K. The estimation of the gradient of a density function, with applications in patten recognition / K. Fukunaga, L.D. Hosteeler // IEEE Tras. on Infor. Theory. – 1975. – V. 21. – P. 32 – 40.
26. Gan, G. Data clustering: theory, algorithms, and applications / G. Gan, C. Ma, J. Wu // ASA-SIAM Ser. on Statistics and Appl. Probability. – SIAM, Philadelphia, ASA, Alexandria, VA, 2007. – 466 p.
27. Goil, S. Mafia: efficient and scalable subspace clustering for very large data sets / S. Goil, H. Nagesh, A. Choudhary // Tech. Rep. CPDC-TR-9906-010. – Center for Parallel and Distributed Computing, Department of Electrical & Computer Engineering, Northwestern University, June 1999.
28. Guha, S. CURE: an efficient clustering algorithm for large databases / S. Guha, R. Rastogi, K. Shim // Proc. ACM SIGMOD Intern. Conf. on Management of Data. – 1998. – P. 73 – 84.
29. Hartigan, J. A. Clustering algorithms / J. A. Hartigan. – N.Y.: John Wiley & Sons, 1975.
30. Hinneburg, A. An efficient approach to clustering in large multimedia databases with noise / A. Hinneburg, D. A. Keim // Proc 4th Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. – N.Y., Aug. 1998. – P. 58 – 65.
31. Ilango, M. A survey of grid based clustering algorithms / M. Ilango, V. Mohan // Intern. J. of Eng. Sci. and Technology. – 2010. – Vol. 2(8). – P. 3441 – 3446.
32. Jain, A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means / A.K. Jain // Patt. Recogn. Lett. – 2010. – Vol. 31. – Is. 8. – P. 651 – 666.
33. Jain, A. K. Statistical pattern recognition: a review / A. K. Jain, R. P. W. Duin, J. Mao // IEEE Trans. on Patt. Anal. and Machine Intell. – 2000. Vol. 22. – № 1. – P. 4 – 37.
34. Jain, A. K. Data clustering: a review / A. K. Jain, M. N. Murty // ACM Computing Surveys. – 1999. – Vol. 31. – № 3. – P. 264 – 323.
35. Kaufman, L. Finding groups in data: an Introduction to cluster analysis / L. Kaufman, P. Rousseeuw. – N.Y.: Wiley & Sons, 1990. – 368 p.
36. Kriegel, H.-P. Incremental OPTICS: efficient computation of updates in a hierarchical cluster ordering / H.-P. Kriegel, P. Kröger, I. Gotlibovich // Proc. 5th Intern. Conf. on Data Warehousing and Knowledge Discovery. – Prague, Czech Republic, 2003. – P. 224 – 233.
37. Kroger, P. Density-connected subspace clustering for high-dimensional data / P. Kroger, H.-P. Kriegel, K. Kailing // Proc. 4th SIAM Intern. Conf. on Data Mining. – Lake Buena Vista, FL, 2004. – P. 246 – 257.
38. Li, X. A note on the convergence of the mean shift / X. Li, Z. Hu, F. Wu // Patt. Recogn. – 2007. – V. 40. – P. 1756 – 1762.
39. Ma, E. W. M. A new shifting grid clustering algorithm / E. W. M. Ma, T. W. S. Chow // Patt. Recogn. – 2004. – Vol. 37. – № 3. – P. 503 – 514.

40. Mercer, D. P. Clustering large datasets / D. P. Mercer // Linacre College, 2003. – Режим доступа: <http://ldc.usb.vt/~mcuriel/Cursos/WC/Transfer.pdf>.
41. Nagesh, H. S. Adaptive grids for clustering massive data sets / H. S. Nagesh, S. Goil, A. Choudhary // Proc. 1st SIAM Intern. Conf. on Data Mining. – Chicago, IL, 2001. – Vol. 417. – P. 1 – 17.
42. Nagesh, H. S. A scalable parallel subspace clustering algorithm for massive data sets / H. S. Nagesh, S. Goil, A. N. Choudhary // Proc. Intern. Conf. on Parallel Processing. – 2000. – P. 477 – 484.
43. Narendra, P. M. A non-parametric clustering scheme for LANDSAT / P.M. Narendra, M. Goldberg // Patt. Recogn. – 1977. – P. 207.
44. Ng, R. T. Efficient and effective clustering methods for spatial data mining / R. T. Ng, J. Han // Proc. 20th Conf. on Very Large Data Bases. – 1994. – P. 144 – 155.
45. Pal, P. A symmetry based clustering technique for multi-spectral satellite imagery / P. Pal, B. Chanda // Proc. Third Indian Conf. on Computer Vision, Graphics and Image Processing. – 2002. – Режим доступа: <http://www.ee.iitb.ac.in/~icvgip/PAPERS/252.pdf>.
46. Pestunov, I. A. Algorithms for processing polizonal video information for detection and classification of forests infested with insects / I. A. Pestunov // Patt. Recogn. And Image Anal. – 2001. – V. 11. – № 2. – P. 368 – 371.
47. Pilevar, A. H. GCHL: a grid-clustering algorithm for high-dimensional very large spatial data bases / A. H. Pilevar, M. Sukumar // Patt. Recogn. Lett. – 2005. – Vol. 26. – № 7. – P. 999 – 1010.
48. Rekik, A. Review of satellite image segmentation for an optimal fusion system based on the edge and region approaches / A. Rekik, M. Zribi, A. Hamida, M. Benjelloun // IJCSNS Intern. J. of Comp. Sci. and Network Security. – 2007. – Vol. 7. – № 10. – P. 242 – 250.
49. Sarmah, S. A grid-density based technique for finding clusters in satellite image / S. Sarmah, D. K. Bhattacharyya // Patt. Recogn. Lett. – 2012. – V. 33. – P. 589 – 604.
50. Schikuta, E. Grid-Clustering: a hierarchical clustering method for very large data sets / E. Schikuta // Proc. 13th Intern. Conf. on Patt. Recogn. – 1993. – Vol. 2. – P. 101 – 105.
51. Selim, S. K-means-type algorithms: a generalized convergence theorem and characterization of local optimality / S. Selim, M. Ismail // IEEE Trans. on Patt. Anal. and Machine Intelligence. – 1984. – Vol. 6. – Is. 1. – P. 81 – 87.
52. Sheikholeslami, G. WaveCluster: a multi-resolution clustering approach for very large spatial databases / G. Sheikholeslami, S. Chatterjee, A. Zhang // Proc. 24th Conf. on Very Large Data Bases. – N.Y., 1998. – P. 428 – 439.
53. Shi Y. A shrinking-based approach for multi-dimensional data analysis / Shi Y., Y. Song, A. Zhang // Proc. 29th Intern. Conf. on Very Large Data Bases. – Berlin, Germany, 2003. – P. 440 – 451.
54. Tantrum, J. Model-based clustering of large datasets through fractionization and refractionization / J. Tantrum, A. Murua, W. Stuetzle // Proc. ACM SIG KDD Conf. – Edmonton, Alberta, Canada, 2002. – P. 183 – 190.
55. Terrell, G. R. Variable kernel density estimation / G. R. Terrell, D. W. Scott // The Annals of Statistics. – 1992. – V. 20. – № 3. – P. 1236 – 1265.
56. Titterton, D. Statistical analysis of finite mixture distributions / D. Titterton, A. Smith, U. Makov – Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 1985.
57. Wang, W. STING: a statistical information grid approach to spatial data mining / W. Wang, J. Yang, M. Muntz // Proc. 1997 Intern. Conf. on Very Large Data Bases. – 1997. – P. 186 – 195.
58. Xu, R. Clustering / R. Xu, D. C. II Wunsch. – N.Y.: John Wiley & Sons, 2009. – 358 p.
59. Xu, R. Survey on clustering algorithms / R. Xu, D. C. II Wunsch // IEEE Trans. On Neural Networks. – 2005. – Vol. 16. – № 3. – P. 645 – 678.
60. Xu, X. A fast parallel clustering algorithm for large spatial databases / X. Xu, M. Ester, H.-P. Kriegel // Proc. 1999 Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. – 1999. – Vol. 3, is. 3. – P. 263 – 290.
61. A distribution-based clustering algorithm for mining in large spatial databases / X. Xu, M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander // Proc. IEEE Intern. Conf. on Data Eng. – 1998. – P. 324 – 331.
62. Yanchang, Z. GDILC: A grid-based density iso-line clustering algorithm / Z. Yanchang, S. Junde // Proc. Intern. Conf. Info-tech and Info-net. – Beijing, China, 2001. – Vol. 3. – P. 140 – 145.
63. Zhang, T. BIRCH: An efficient data clustering method for very large databases / T. Zhang, R. Ramakrishnan, M. Livny // Proc. ACM-SIGMOD Intern. Conf. on Management of Data. – 1996. – P. 103 – 114.
64. Zhao, Y. Enhancing grid-density based clustering for high dimensional data / Y. Zhao, J. Cao, C. Zhang, S. Zhang // J. of Systems and Software. – 2011. – Vol. 84, is. 9. – P. 1524 – 1539.
65. Zhao, Y. AGRID: An efficient algorithm for clustering large high-dimensional datasets / Y. Zhao, J. Song // Proc. 7th Pacific-Asia Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. – Seoul, Korea, 2003. – P. 271 – 282.
66. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин – М: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
67. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – С. 812.

68. Загоруйко, Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н. Г. Загоруйко. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. – 270 с.
69. Дидэ, Э. Методы анализа данных: Подход, основанный на методе динамических сгущений: Пер. с фр. / Кол. авт. под рук. Э. Дидэ. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 357 с.
70. Дюран, Н. Кластерный анализ / Н. Дюран, П. Оделл. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
71. Епанечников, В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности / В. А. Епанечников // Теория вероятностей и ее применение. – 1969. – Т. 14, № 1. – С. 156 – 160.
72. Ёлкин, Е. А. О возможности применения методов распознавания в палеонтологии / Е. А. Ёлкин, В. Н. Ёлкина, Н. Г. Загоруйко // Геология и геофизика. – 1967. – № 9. – С. 75 – 78.
73. Миркин, Б. Г. Группировки в социально-экономических исследованиях: Методы построения и анализа / Б. Г. Миркин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 223 с.
74. Пестунов, И. А. Непараметрический алгоритм кластеризации данных дистанционного зондирования на основе grid-подхода / И. А. Пестунов, Ю. Н. Синявский // Автометрия. – 2006. – Т. 42. – № 2. – С. 90 – 99.
75. Пестунов, И. А. Сегментация многоспектральных изображений на основе ансамбля непараметрических алгоритмов кластеризации / И. А. Пестунов, В. Б. Бериков, Ю. Н. Синявский // Вестн. СибГАУ. – 2010. – Т. 31. – № 5. – С. 45 – 56.
76. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных / И. А. Пестунов, В. Б. Бериков, Е. А. Куликова, С. А. Рылов // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 3. – С. 49 – 58.
77. Сидорова, В. С. Анализ многоспектральных данных дистанционного зондирования покрова Земли с помощью гистограммного иерархического кластерного алгоритма / В. С. Сидорова // Тр. Междунар. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2011». – 2011. – Т. 4. – С. 116 – 122.
78. Ту, Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
79. Фукунага, К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / К. Фукунага. – М.: Наука, 1979. – 368 с.
80. Системы искусственного интеллекта. Практический курс: учебное пособие / В. А. Чулюков, И. Ф. Астахова, А. С. Потапов [и др.]. – М.: Бином, 2008. – 292 с.

Информация об авторах:

Пестунов Игорь Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией обработки данных Института вычислительных технологий СО РАН, т. 8(383)334-91-55, pestunov@ict.nsc.ru.

Pestunov Igor Alexeevich – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Laboratory for Data Processing at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Синявский Юрий Николаевич – научный сотрудник Института вычислительных технологий СО РАН, т. 8(383)334-91-55, yorikmail@gmail.com.

Sinyavskiy Yuriy Nikolaevich – researcher at the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 551.511.61+504.054:504.3.0.53

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА В ОКРЕСТНОСТЯХ АЭС «ФУКУСИМА – 1»

В. Ф. Раныта

NUMERICAL ANALYSIS OF THE DATA OF SURFACE RADIATION MONITORING IN THE VICINITY OF THE NUCLEAR POWER STATION «FUKUSHIMA-1»

V. F. Ranyta

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4.4.

Предложена модель реконструкции полей выпадений по оси следа полидисперсной примеси от мгновенного источника. Для описания процесса переноса аэрозолей в атмосфере использовано полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии. Фракционный состав примеси в источнике по скоростям оседания задаётся с помощью двойного гамма-распределения. Проведена апробация разработанной модели

реконструкции на данных наземного мониторинга аварийного загрязнения окрестностей атомной станции «Фукусима – 1».

A model of reconstruction of fields of losses of a polydisperse impurity from an instant source on a trace axis is proposed. For the description of process of carrying over of aerosols in atmosphere the semiempirical equation of turbulent diffusion is used. The fractional structure of an impurity in a source on speeds of subsidence is set by means of double gamma distribution. Approbation of the model of reconstruction on the data of monitoring of emergency pollution of vicinities of radiochemical factory the nuclear power station «Fukushima-1» is spent.

Ключевые слова: численное моделирование, аэрозоль, атомная станция, радиоактивное загрязнение, реконструкция, обратная задача.

Keywords: Numerical simulation, aerosol, nuclear power station, radioactive pollution, reconstruction, inverse problem.

Введение

Проблема определения количественных характеристик радиоактивного загрязнения природных сред в результате аварий на атомных станциях и предприятиях ядерно-технологического цикла является весьма актуальной. Применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей в принципе даёт возможность вполне корректного описания полей концентраций, но в данном случае этот подход сталкивается со значительными затруднениями обеспечения моделей соответствующей входной информацией. К ним следует отнести: неопределённости высоты и мощности источника выброса радионуклидов в атмосферу, распределение в начальном облаке аэрозольных частиц по размерам и скоростям оседания, определение текущих метеорологических условий и т. д. Сложным является вопрос о радионуклидном составе выброшенных смесей. В связи с этим возникает насущная необходимость использования при численном моделировании дополнительной экспериментальной информации о полях загрязнения и создания соответствующих моделей реконструкции [1, с. 5 – 18; 2, с. 102 – 108; 3, с. 10 – 16; 4, с. 5 – 8; 5; 6, с. 3 – 48].

Следует отметить, что при использовании постановок обратных задач нежелательно слишком детальное описание процессов переноса радионуклидов, поскольку это может привести к большим трудностям их обоснования и численной реализации. Необходимым этапом решения этих задач является анализ информативности используемой экспериментальной информации, планирования и оптимизации систем мониторинга [7; 8, с. 1053 – 1059].

1. Модель реконструкции атмосферных выпадений полидисперсной примеси

Предварительный анализ полученных экспериментальных данных наблюдений аэрозольных выпадений радионуклидов показывает, что изменение их концентраций по мере удаления от места аварийного выброса может быть весьма значительным. Это позволяет сделать предположение о присутствии в их составе как крупных, так и достаточно мелких аэрозольных фракций. Для априорного описания распределения вещества примеси по скоростям оседания w в атмосфере воспользуемся следующей двупараметрической функцией [9, с. 78 – 87; 10, с. 86 – 88]:

$$N(w) = \frac{a^{m+1}}{\Gamma(m+1)} w^m e^{-aw},$$

$$m \geq -1, \quad a = \frac{m}{w_m},$$
(1)

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси, m – степень однородности распределения частиц примеси по скоростям w , $\Gamma(m)$ – гамма-функция Эйлера.

Исходным моментом для расчета поля выпадений полидисперсной примеси от точечного источника является соотношение [9, с. 78 – 87]:

$$p = \int_0^\infty w q_w N(w) dw,$$
(2)

где q_w – поле концентрации монодисперсной примеси со скоростью оседания w .

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых используется степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [11]:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad K_z = k_1 \frac{z}{z_1}, \quad (3)$$

где u_1 и k_1 – значения u и K_z при $z = z_1$.

С использованием соотношений (3) и аналитических решений уравнения турбулентной диффузии для относительно невысоких источников поле концентрации q_w вблизи земли можно представить в виде [9]:

$$q_w(x, y) = \frac{M c^\omega}{2(1+n) \sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+\omega) x^{1.5+\omega}} \exp \left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x} \right). \quad (4)$$

Здесь ось x ориентирована в направлении ветра, ось y направлена в поперечном ветру направлении, M – мощность источника примеси, k_0 – параметр турбулентного обмена в направлении оси y ,

$$c = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1}, \quad \omega = \frac{w}{k_1 (1+n)}. \quad (5)$$

С учётом соотношений (1), (4) выражение (2) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} p(x, y) &= \frac{Ma^{m+1}}{2(1+n) \sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp \left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x} \right) \int_0^\infty \frac{w^{m+1} \exp(-aw)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x} \right)^\omega dw = \\ &= \frac{Ma^{m+1} (1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp \left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x} \right) \int_0^\infty \frac{\omega^{m+1} \exp(-ak_1(1+n)\omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x} \right)^\omega d\omega \end{aligned} \quad (6)$$

В частности, для осевой концентрации ($y = 0$) соотношение (6) представляется в виде:

$$\begin{aligned} p_{ось}(x) &= \frac{\theta_1}{x^{1.5}} \exp \left(-\frac{c}{x} \right) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x} \right)^\omega d\omega, \\ \theta_1 &= \frac{Ma^{m+1} (1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}}, \quad \theta_2 = m+1, \quad \theta_3 = ak_1(1+n). \end{aligned} \quad (7)$$

Исследование свойств функции (7) показывает, что она в интервале значений $x \in (0, \infty)$ достигает максимума в некоторой точке x_0 , монотонно возрастает при $x \in (0, x_0)$ и соответственно монотонно убывает в интервале значений $x \in (x_0, \infty)$ и стремится к нулю при $x \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$. Оценка неизвестных параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 , входящих в соотношение (7), проводится методом наименьших квадратов с использованием данных измерений уровней радиации в точках местности. Следует также отметить, что величина C соответствует величине расстояния, на котором достигается максимальная приземная концентрация лёгкой примеси [12].

Замечание 1. Параметры θ_2 , θ_3 зависят от характеристик дисперсного состава аэрозольной примеси и метеорологических условий. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество опорных точек измерений при проведении повторного оценивания осевого загрязнения в другие моменты времени. В этом случае достаточно лишь провести переоценку параметра θ_1 , который согласно (7) пропорционален мощности источника и изменение которого будет происходить лишь вследствие радиоактивного распада выпавших нуклидов.

Замечание 2. Для описания распределения спектра размеров частиц в первоначальном облаке взрыва можно было бы использовать и логарифмически нормальное распределение, но учитывая его близость к

гамма- распределению, было выбрано описание в виде соотношения (1). В данном случае использование (1) заметно упрощает получение представлений вида (7) для оценивания полей выпадений полидисперсных примесей.

2. Анализ данных наблюдений радиоактивного загрязнения почвенного покрова в региональных окрестностях АЭС «Фукусима – 1»

Мощное землетрясение 11 марта 2011 г. у берегов Японии обусловило отключение на АЭС «Фукусима – 1» централизованного электроснабжения, а последующее за ним катастрофическое цунами вывело из строя резервные дизель-генераторы, что не позволило в дальнейшем проводить эффективное охлаждения активных зон остановленных реакторов и в конечном итоге привело к серии мощных взрывов на станции с выбросом в атмосферу смеси радионуклидов, включающих радиоактивные изотопы йода, цезия. В частности, в направлении на северо-запад от АЭС (префектура Фукусима) образовался след выпадений с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Зафиксированы также значительные превышения содержания радионуклидов Cs-134, Cs-137, I-131 в прибрежных водах возле АЭС.

В префектуре Фукусима ежедневно производится автомобильная радиационная разведка района загрязнения за пределами 20-и километровой зоны вокруг АЭС. Данные этого мониторинга ежедневно появляются в открытом доступе на сайте Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологии Японии (МЕХТ). В начальный период загрязнения (15 – 18 марта) максимальная мощность дозы в 30 км на северо-запад от АЭС составляла порядка 150 – 170 мкЗв/ч. В дальнейшем снижение мощности дозы на следе происходило довольно быстро, что указывает на наличие в составе выброса значительной доли коротко живущих радионуклидов. Некоторые пробы почвы, отобранные в радиусе 500 м от АЭС, показали наличие в ней изотопов плутония. Дальнейший анализ проб позволил установить, что концентрации плутония в пробах находятся на уровне концентраций плутония, связанных с проводимыми ранее атмосферными испытаниями ядерного оружия. Проводятся работы по распылению полимеров для создания защитной пленки на поверхности земли с целью воспрепятствовать распространению радиоактивности вместе с пылевыми частицами.

Количественная информация о радионуклидном составе аварийных выбросов в атмосферу продолжает уточняться. В основном это радиоактивные изотопы: Cs-137, Cs-134 и I-131. Изотоп I-131 представлен в наибольшем количестве. Период его полураспада сравнительно невелик и составляет 8.04 суток. И благодаря этому происходит быстрое снижение мощности дозы на радиоактивном следе. Наличие же в почве изотопов Cs-134 и Cs-137 определяет картину существенно более длительного радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Период полураспада Cs-134 составляет 2,3 года. Cs-137 – β , γ – излучающий радиоизотоп цезия с периодом полураспада около 30 лет.

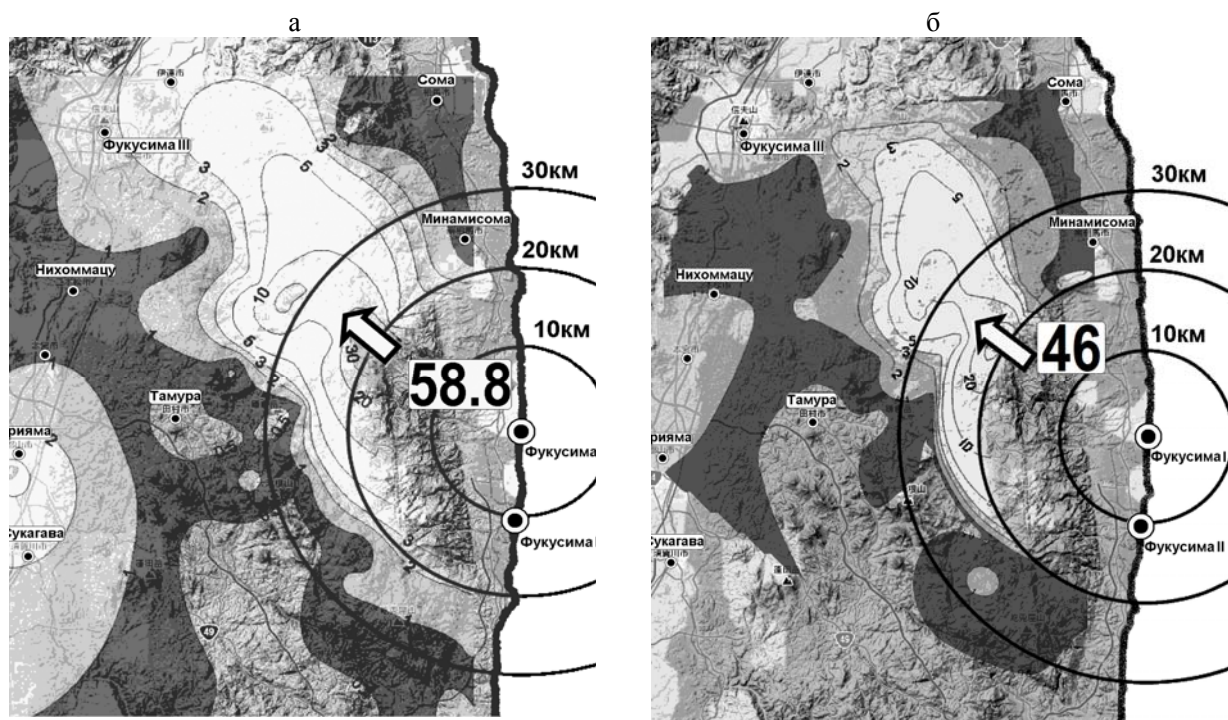


Рис. 1. Карты следов радиоактивного загрязнения почвы от серии взрывов на АЭС «Фукусима – 1»: а) по состоянию на 7 апреля 2011 г. (мкЗв/ч); б) по состоянию на 7 мая 2011 г. (мкЗв/ч)

На рис. 1а представлена карта мощности доз (мкЗв/ч) на 7 апреля 2011 г., построенная на основании данных передвижного мониторинга. Максимальная доза в 20 км от АЭС на радиоактивном следе к этому времени составила 58.8 мкЗв/ч. Для проведения численной реконструкции загрязнения по оси следа в качестве опорных точек измерений использовались точки со значениями доз 3, 5 и 10 мкЗв/ч. На рис. 2а представлены результаты реконструкции осевой части следа, полученные с использованием соотношения (7), по указанным выше опорным значениям мощностей доз. Анализ результатов численного моделирования показывает, что восстановленная кривая вполне удовлетворительно описывает загрязнение по оси следа и что зависимость (1) позволяет достаточно адекватно воспроизвести спектр распределения выброшенных взрывами на АЭС частиц по скоростям оседания. Быстрый рост мощности доз в направлении к АЭС указывает на то, что подобную тенденцию следует ожидать и внутри 20 километровой зоны. Зависимость (7) позволяет вполне надёжно провести оценивание уровней осевого радиоактивного загрязнения внутри рассматриваемой зоны до расстояний не менее 5 – 10 км от АЭС. Для повышения точности описания уровней загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учёт распределения активности по вертикали в момент выброса радионуклидной смеси.

На рис. 1б представлена карта мощности доз (мкЗв/ч) на 7 мая 2011 г., также построенная на основании данных передвижного мониторинга. Максимальная доза в 20 км от АЭС на радиоактивном следе снизилась уже до 46 мкЗв/ч. С учётом замечания 1 для проведения численной реконструкции загрязнения по оси следа в данном случае использовалась лишь одна опорная точка наблюдения, удалённая от АЭС по оси следа на 20 км со значением дозы 46 мкЗв/ч. Соответственно на рис. 2б и 2в представлены результаты реконструкции по состоянию на 24 апреля и 7 мая 2011 г. На рис. 2г приведены результаты реконструкции по состоянию на 11 марта 2012 г. с использованием уже прогнозного поля загрязнения через год после аварии, полученного методами прямого моделирования.

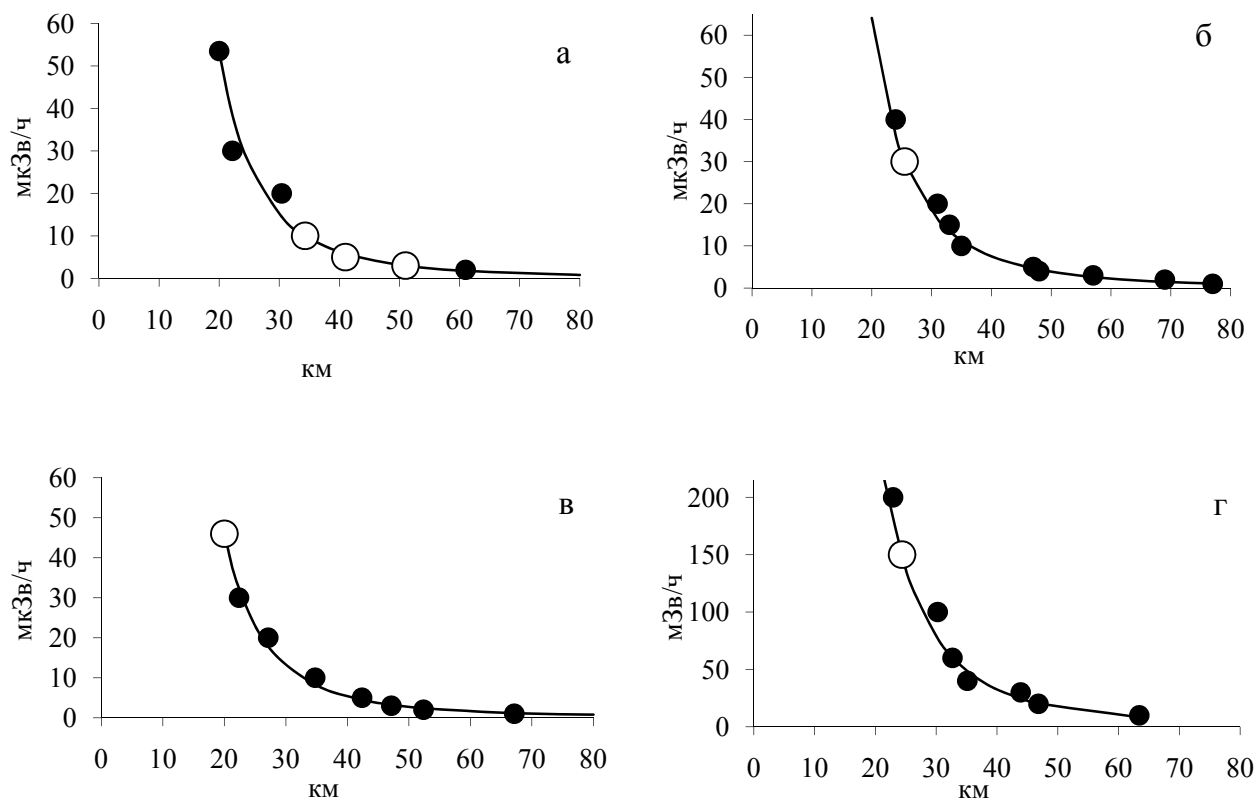


Рис. 2. Численная реконструкция осевой части следа радиоактивных выпадений от аварии на АЭС «Фукусима – 1»: а) по состоянию на 7 апреля, б) – на 24 апреля 2011 г., в) – на 7 мая 2011 г., г) – на 11 марта 2012 г.

— результат численного моделирования, ○, ● – опорные и контрольные точки измерений

Анализ результатов реконструкций, представленных на рис. 2в – 2г, показывает эффективность использования полученных оценок параметров θ_2 , θ_3 по состоянию радиационной обстановки на 7 апреля 2011 г. Продемонстрирована возможность восстановления осевого загрязнения и для других сроков наблюдений по существенно более ограниченной информации. Согласие данных радиационного мониторинга и численной реконструкции в диапазоне расстояний от 20 до 80 км даёт подтверждение как надёжности данных выполненных измерений, так и определённой универсальности полученных оценок параметров θ_2 , θ_3 применительно к рассматриваемому аварийному загрязнению территории в окрестности атомной станции.

Заключение

Разработанная малопараметрическая модель реконструкции выпадений полидисперсной примеси даёт возможность численного анализа данных наблюдений практически по всей оси следа. Для получения оценок неизвестных параметров в зависимости (7) требуется привлечение относительно небольшого числа точек измерений. Как показал численный анализ данных радиационного мониторинга, весьма полезным приёмом оказалось выделение группы параметров, зависящих от характеристик дисперсного состава, что позволило при восстановлении полей осевых концентраций в другие моменты времени дополнительно сократить количество используемых уровней измерений. Весьма необходимой является информация о количественном составе выброшенной в атмосферу радионуклидной смеси. Её наличие позволяет после проведения численной реконструкции поля выпадений нуклидов дать прогноз радиационной обстановки на последующие моменты времени без привлечения дополнительных измерений.

Для повышения точности восстановления полей по данным мониторинга аварийного загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учёт вертикального распределения относительной активности в облаке взрыва. В связи с этим полезно привлечение дополнительной априорной информации о характере и мощности произошедших на АЭС взрывах.

Автор выражает благодарность профессору Н. А. Прибатурину за представленную информацию и полезные обсуждения в процессе работы.

Литература

1. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний [Текст] / Ю. А. Израэль [и др.] // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 8.
2. Современная интерпретация данных воздушной и наземной радиационных разведок следа первого ядерного испытания в СССР в 1949 г. [Текст] / И. А. Андрюшин [и др.] // Вестник научной программы «Семипалатинский полигон – Алтай». – 1995. – № 2.
3. Рапута, В. Ф. Модели реконструкции загрязнения осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа [Текст] / В. Ф. Рапута // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – Ч. 2. – Спецвыпуск.
4. Радиоактивное загрязнение местности в результате аварии на радиохимическом заводе в Томске – 7 / Ю. А. Израэль [и др.] // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 6.
5. Булатов, В. И. Томская авария: мог ли быть сибирский Чернобыль? / В. И. Булатов, В. А. Чирков. – Новосибирск: ЦЭРИС, 1993. – 32 с.
6. Анализ и прогноз радиационной обстановки в районе аварии на Сибирском химическом комбинате [Текст] / С. М. Вакуловский, В. М. Шершаков, Р. В. Бородин [и др.] // Радиация и риск. – 1993. – Вып. 3. – Приложение 2.
7. Успенский, А. Б. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов [Текст] / А. Б. Успенский, В. В. Федоров. – М.: МГУ, 1975. – 168 с.
8. Pitovranov, S. E. Optimal sampler siting for atmospheric tracer experiments taking into account uncertainties in the wind field [Текст] / S. E. Pitovranov, V. V. Fedorov, L. L. Edwards // Atmos. Environ. – 1993. – Vol. 27A. – № 7.
9. Прессман, А. Я. О распространении в атмосфере тяжёлой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника [Текст] / А. Я. Прессман // Инженерно-физич. журн. – 1959. – Т. 2. – № 3.
10. Петров, В. Н. Оценка влияния турбулентного рассеяния по вертикали и в направлении ветра на распространение полидисперсной примеси [Текст] / В. Н. Петров, А. Я. Прессман // ДАН СССР. – 1962. – Т. 146. – № 1.
11. Бызова, Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси [Текст] / Н. Л. Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 278 с.
12. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

Информация об авторе:

Рапута Владимир Федотович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 8(8383) 333-07-21, raputa@sscc.ru

Raputa Vladimir Fedotovitch - Doctor of Physics and Mathematics, leading researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 551.324.3.(571.151)

МОНИТОРИНГ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ: ЗАДАЧИ, НОВЫЕ МЕТОДЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

С. Ю. Самойлова

MOUNTAIN GLACIERS MONITORING: PROBLEMS, NEW METHODS, EXPECTATIONS

S. Y. Samoylova

Работа выполнена в рамках проекта VII.63.3.2. – Ледники как индикаторы климатических изменений под влиянием вулканической деятельности.

В статье рассмотрены история и принципы организации наблюдений за колебаниями ледников на Алтае. Представлен опыт использования геодезических GPS-систем и ГИС для мониторинга ледников.

History and methods of organizing supervision over glaciers fluctuations in Altai are discussed in this paper. Methodology and results of using geodesic GPS-systems and GIS for glaciers monitoring are reported.

Ключевые слова: мониторинг, ледник, климатические изменения, топографическая съемка, запасы льда.

Keywords: monitoring, glacier, climatic changes, topographic survey, ice stock.

В последние десятилетия одной из наиболее дискуссионных научных проблем является проблема глобального потепления. В настоящее время доказано, что мы находимся в теплой фазе ледниковой эпохи внутри четвертичного периода [7, с. 8 – 13], начало которой приурочено ко второй половине XIX в. (конец так называемого Малого ледникового периода). Несмотря на научно-технический прогресс, жизнь современного человечества до сих пор в значительной степени зависит от природной среды, поэтому исследование природных систем в условиях изменения климата, несомненно, актуально.

В связи с этим большое значение имеют наблюдения за колебаниями ледников, т. е. динамикой их размеров и формы, вызванных изменениями внутреннего режима и климата. Обусловлено это, в первую очередь, тем, что они являются чувствительными индикаторами как местных, так и глобальных климатических изменений. Во-вторых, ледники являются источниками чистой пресной воды. В благоприятные периоды (похолодание или увлажнение) ледники накапливают вещество (снег и лед), а в неблагоприятные (потепление или иссушение) – отдают его в виде талого стока, изменяя при этом свои размеры и форму. При этом связь между динамикой ледников и климатом достаточно сложная, поскольку ороклиматические условия сугубо индивидуальны для каждого объекта. Время ответной реакции горных ледников на климатические изменения может достигать от 10 до 100 лет и более [6, с. 116 – 124]. Поэтому наблюдения за динамикой ледников должны носить многолетний систематический характер.

Исследования ледников на Алтае

На Алтае инструментальные наблюдения за ледниками начаты в конце XIX в. В 1895 – 1911 гг. Профессором Томского государственного университета В. В. Сапожниковым с помощью теодолита была выполнена топографическая съемка ледников массивов Белухи, Табын-Богдо-Ола, верховьев Чаган-Узуна, зафиксировано положение концов крупных ледников. Последующие полвека большая часть работ на ледниках Алтая была связана с именем М. В. Тронова. Помимо описания и каталогизации ледников, М. В. Троновым были изучены закономерности их пространственного распределения, механизмы взаимосвязи оледенения с рельефом и климатом.

Систематические исследования режима и динамики ледников были начаты в период Международного геофизического года (МГГ, 1957 – 1958 гг.) и последовавшего за ним Международного гидрологического десятилетия (МГД, 1966 – 1975 гг.). Наблюдения за составляющими водного и ледового баланса, колебаниями ледников проводились в опорных бассейнах: в верховьях рек Мульты, Актру и Аккема. После окончания МГД исследования были продолжены под эгидой Международной гидрологической программы (МГП). Одновременно с МГП слежение проводилось в рамках программы наблюдений за колебаниями

ледников. Для выполнения этих двух программ в Советском Союзе были отобраны 7 горно-ледниковых бассейнов в различных регионах, в т. ч. на Алтае в качестве опорного был выбран бассейн верховьев р. Актру. После окончания МГП (1984 г.) материалы за составляющими водного и ледового балансов, а также за колебаниями ледников в бассейне были опубликованы [2]. В последние десятилетия значительная работа по наблюдению за ледниками проводилась сотрудниками ТГУ. Были получены количественные показатели изменения морфометрических параметров 120 ледников [3, с. 93 – 101; 4, с. 34 – 39].

На основе имеющихся материалов, а также современных исследований, выполняемых с использованием новейших методик и технологий, можно проследить динамику ледников за весь период инструментальных наблюдений, исследовать механизмы взаимосвязи климата и оледенения.

Сотрудниками ИВЭП СО РАН, АлтГУ (г. Барнаул) и ИЭЧ СО РАН (г. Кемерово) в течение полевых сезонов 2009 – 2011 гг. выполнялась топографическая съемка ледников Томич (Катунский хребет, бассейн р. Мульты), Водопадный и Левый Тетё (Северо-Чуйский хребет, бассейн р. Актру, массив Купол). Основная цель работы: проследить динамику морфометрических параметров ледников с использованием данных топографических съемок прошлых лет.

Методика наблюдений за колебаниями ледников

Наиболее старый, простой и распространенный способ наблюдений за колебаниями ледников – маркировка их концов. В настоящее время источником информации об изменении длин и площадей ледников также могут являться данные космических съемок. Однако наиболее объективным и информативным показателем колебаний ледников служит изменение их массы или объема. Его можно определить по изменению площади и высоты поверхности ледника. Единственным имеющимся в нашем распоряжении способом получения информации об изменениях высоты поверхности ледников с приемлемой точностью (в пределах нескольких сантиметров) являются топогеодезические работы.

С начала 1970-х до середины 1990-х гг. топографическая съемка ледников на Алтае производилась Р. М. Мухаметовым. Первая топографическая съемка была выполнена им в 1973 году на леднике Томич. Основа топоплана составлена по материалам теодолитной съемки (теодолит Т-30). Сгущение горизонталей проводилось на основании фототеодолитной съемки (фототеодолит Karl Zeiss, Jena), а ее обработка производилась в МГУ (под руководством Ю. Ф. Книжникова). Карта ледника Томич, в масштабе 1:10000, приводится в монографии «Горноледниковые бассейны Алтая» [5]. Повторные съемки ледника Томич проводились Р. М. Мухаметовым в 1983 и 1995 гг. Аналогичным образом была выполнена съемка 27 ледников Алтая с интервалом в 5 – 10 лет [1].

В 2009 – 2011 гг. для топографической съемки ледниковой поверхности использовались геодезические GPS Leica SR20 и Epoch 10. Это одночастотные (L1) геодезические системы для выполнения профессиональных топографических измерений с сантиметровой точностью в режимах «STATIC» и «KINEMATIC» с постобработкой. Такие приемники можно использовать в качестве устройства для сбора геоданных и как опорную GPS станцию. При съемке поверхности ледника используется два приемника: один в качестве базовой станции производит съемку на опорной точке в режиме «STATIC», с помощью второго, работающего в режиме «KINEMATIC», измеряются координаты точек на поверхности ледника.

Поскольку топографическая съемка ледников из-за их труднодоступности требует значительных материальных и физических затрат, работа с геодезическими GPS позволяет существенно ускорить и упростить процесс съемки по сравнению с теодолитом или тахеометром. При этом в условиях высокогорий работа с подобными приборами имеет определенные особенности.

Во-первых, для съемки необходим устойчивый сигнал 4 и более спутников, поэтому предпочтительнее всего использовать GPS на открытых площадках и в ясную погоду. В условиях сильно расчлененного рельефа при запуске GPS поиск спутников занимает больше времени, инициализация прибора может составлять до 30 – 40 минут. В процессе работы сигнал спутников может пропадать, после чего необходима новая инициализация. Естественно, это сильно замедляет работу. В некоторых случаях (например, в глубоком ущелье) GPS может не «поймать» сигнал достаточного количества спутников. Так, например, при попытке съемки языка ледника Малый Актру в пасмурную погоду, GPS Leica SR 20 смог принять сигнал только двух спутников, что не позволило выполнить измерения. При работе на ледниках массива Купол и в каре ледника Томич подобных проблем не возникало.

Во-вторых, в условиях труднодоступных высокогорий серьезную проблему представляет необходимость подзарядки или замены элементов питания. На большой абсолютной высоте в условиях пониженных температур время работы аккумуляторов сокращается на 20 – 30 %.

В-третьих, съемка производится только на той части ледника, которая доступна для относительно безопасного передвижения. Так, на леднике Томич во время съемки 2009 – 2010 гг. точками было охвачено около 70 % ледниковой поверхности, на леднике Водопадном – практически 100 % поверхности, на леднике Левый Тетё – около 30 – 40 %. На рисунке 1 показаны точки съемки ледника Томич 2009 – 2010 гг.

Постобработка результатов измерений производится с помощью поставляемого вместе с GPS программного обеспечения Geo Office, которое позволяет впоследствии экспортировать данные в системы GIS и CAD.

Результаты работ: климатические изменения и колебания ледника

Сопоставляя топографические съемки прошлых лет с полученными материалами, можно определить изменение высоты поверхности ледников. В качестве примера в данной статье приведены результаты работ на леднике Томич. На рисунке 2 представлено изменение поверхности ледника Томич с 1973 по 2010 гг. За период наблюдений произошло значительное сокращение его толщины (до 50 м и более на языке), в среднем она уменьшилась на 18,9 м.

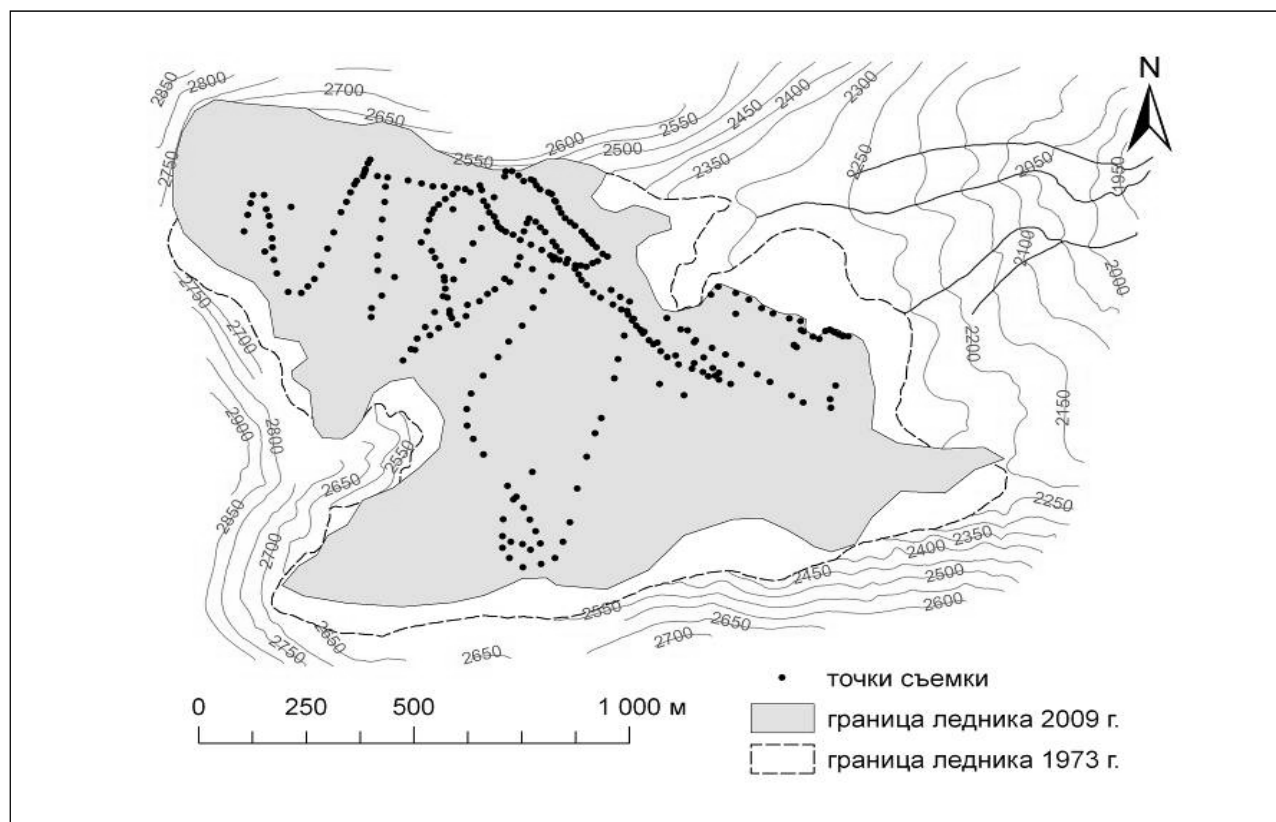


Рис. 1. Точки топографической съемки ледника Томич

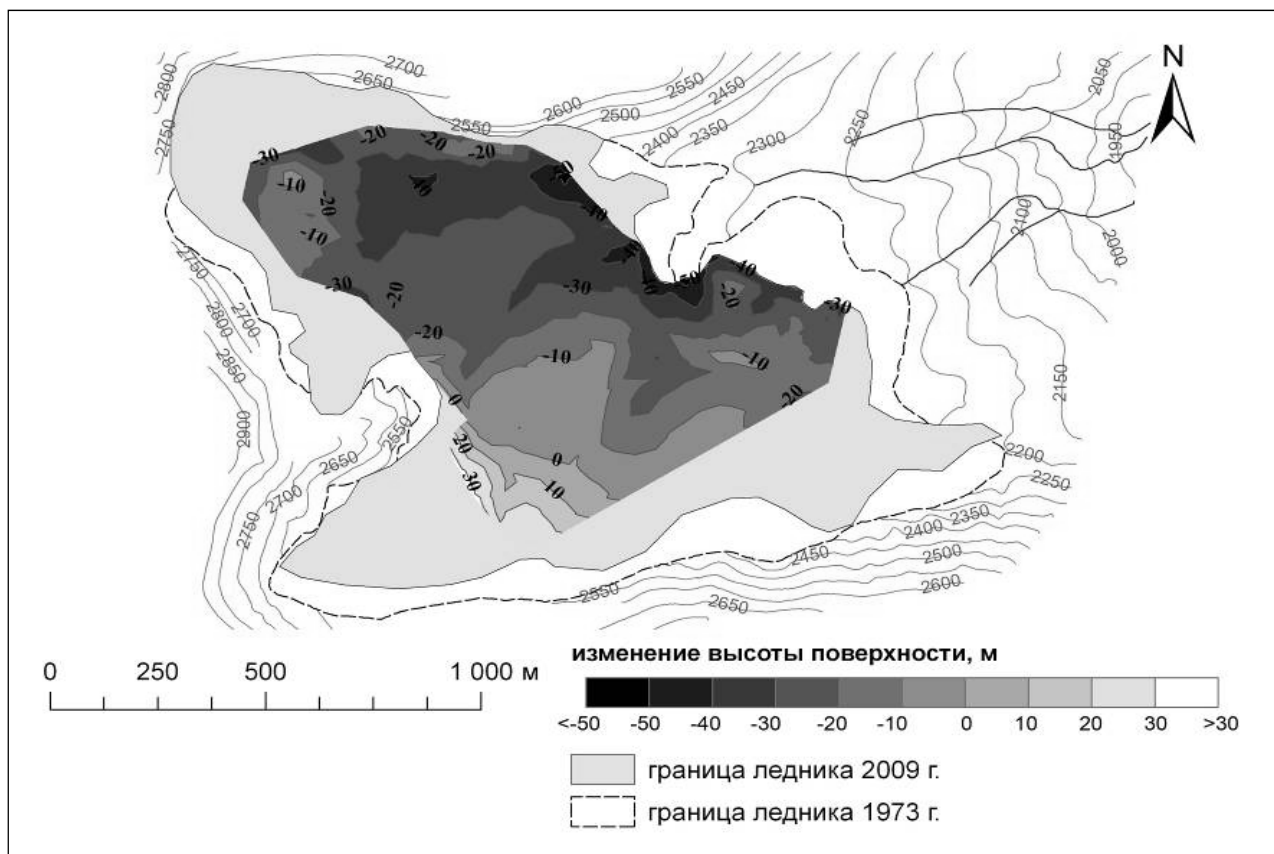


Рис. 2. Изменение поверхности ледника Томич с 1973 по 2010 гг.

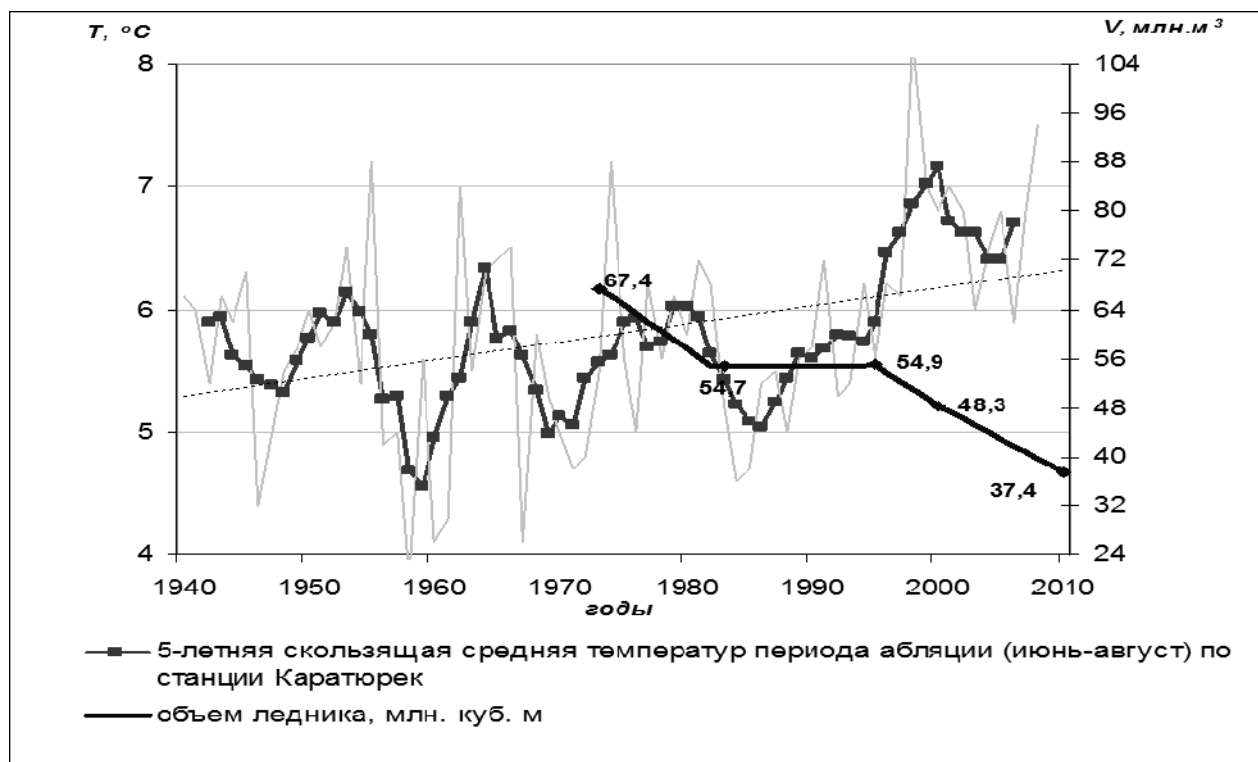


Рис. 3. Изменение средней летней температуры по станции Каратюрек и динамика объема ледника Томич

Наиболее значительное влияние на ледники оказывает изменение теплоприхода, самым простым и достоверным показателем которого является среднелетняя температура [1]. На рисунке 3 представлено изменение объема ледника Томич с 1973 по 2010 гг. и кривая температур периода абляции (июнь – август) по станции Каратюрёк (северный склон Катунского хребта, абсолютная высота 2605 м, наблюдения с 1939 г.). Информация о толщине и объеме ледника Томич получена по материалам радиолокационной съемки, выполненной в 2000 г. гляциологическим отрядом ТГУ [4].

Динамика объема ледника хорошо согласуется с температурной кривой. Так, в периоды с 1973 по 1983 гг. и с 1995 г. по настоящее время ледник интенсивно таял. В начале 1980-х – 1990-х гг., когда летние температуры были ниже средних (рис. 3), объем ледника оставался неизменным и даже незначительно увеличился, при этом язык ледника продолжал отступать. Общая потеря запасов льда за период с 1973 по 2010 гг. составила приблизительно 30 млн. м³, то есть с 1973 г. объем ледника Томич сократился на 45 %. Площадь ледника за этот период сократилась на 19 %. Таким образом, сокращение запасов льда произошло в большей степени за счет уменьшения толщины ледника. Причем наряду с интенсивным уменьшением толщины ледника на языке, на отдельных участках фирнового бассейна происходит накопление вещества (рис. 2).

Систематическое выполнение съемки поверхности ледников поможет исследовать реакцию отдельных ледников и их групп на климатические изменения, что позволит впоследствии исследовать и прогнозировать изменение речного стока и запасов воды в горно-ледниковых бассейнах.

Автор выражает благодарность канд. геол. наук, доценту В. П. Галахову (ИВЭП СО РАН), канд. геол. наук О. В. Останину (АлтГУ) за помощь в проведении работ.

Литература

1. Галахов, В. П. Ледники Алтая / В. П. Галахов, Р. М. Мухаметов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1999. – 136 с.
2. Ледники Актру (Алтай) / В. П. Галахов, Ю. К. Нарожный, С. А. Никитин [и др.] – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 119 с.
3. Нарожный, Ю. К. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI века / Ю. К. Нарожный, С. А. Никитин // Материалы гляциологических исследований. – 2003. – Вып. 95.
4. Распределение объемов льда в западной части Катунского хребта по данным радиолокационного зондирования / С. А. Никитин, А. В. Веснин, А. В. Осипов, Н. В. Игловская // Вестник ТГУ. – 2001. – № 274.
5. Ревякин, В. С. Горноледниковые бассейны Алтая / В. С. Ревякин, В. П. Галахов, В. П. Голещихин. – Томск: Изд-во ТГУ, 1979. – 310 с.
6. Хеберли, В. Опыт использования кадастровых данных для оценки основных гляциологических характеристик и воздействия региональных изменений климата на горные ледники (на примере Альп) / В. Хеберли, М. Хёльцле // Материалы гляциологических исследований. – 1997. – Вып. 82.
7. Hagedon, H. Eiszeit, Klimaänderung und Menschheit / H. Hagedon // Akademie aktuell. – Dezember. – 2004.

Информация об авторе:

Самойлова Светлана Юрьевна – кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, т. 8(3852)667893, bastet@iwep.asu.ru

Samoylova Svetlana Yurievna – Doctor of Geography, researcher of Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS.

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ НАБЛЮДЕНИЙ
ЗА СОСТОЯНИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

*О. Э. Якубайлик, А. А. Гостева, М. Г. Ерунова, А. А. Кадочников,
А. Г. Матвеев, А. С. Пятаев, А. В. Токарев*

**DEVELOPING INFORMATION SUPPORT TOOLS
FOR OBSERVATIONS OF THE ENVIRONMENT STATE**

*O. E. Yakubailik, A. A. Gosteva, M. G. Erunova, A. A. Kadochnikov,
A. G. Matveev, A. S. Pyataev, A. V. Tokarev*

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВМ СО РАН) и Сибирском федеральном университете.

В работе изложены результаты работы коллектива в области создания программного обеспечения для информационно-аналитической поддержки задач экологического мониторинга. Одной из таких систем является "ГИС мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края". Решаются задачи организации технологической среды для интеграции формируемых в процессе мониторинга информационных ресурсов, информационного взаимодействия пользователей, создания баз геопространственных данных, интерфейсов и сервисов для визуализации и аналитической обработки накапливаемой информации, тематических веб-приложений. Для реализации используется открытое и свободное программное обеспечение ГИС.

The paper contains the results of the team work on development of information support software tools for observations of the environment state. One of such systems is "GIS of monitoring the state of the environment in the zone of oil and gas industry enterprises of Krasnoyarsk territory". The problems of organization of the technological environment for the integration of the data generated in the process of monitoring of information resources are solved. Also solve the problems of users interaction, geospatial database creation, creation of interfaces and services for visualization and analytical processing of the accumulated information, and thematic web-based mapping applications development arte addressed. The implementation is based on open source and free GIS software.

Ключевые слова: экологический мониторинг, веб-картография, геоинформационный Интернет-сервер, геопространственные данные, картографический веб-сервис, каталог метаданных.

Keywords: environmental monitoring, web-mapping, GIS. web server, geospatial data, web map service, metadata catalog.

Введение

В соответствии со ставшим уже каноническим определением, экологический мониторинг – это информационная система наблюдений, оценки и прогноза изменений в состоянии окружающей среды, созданная с целью выделения антропогенной составляющей этих изменений на фоне природных процессов. Система экологического мониторинга должна накапливать, систематизировать и анализировать информацию о состоянии окружающей среды и ее изменениях, о причинах наблюдаемых и вероятных изменений состояния (т. е. об источниках и факторах воздействия), о допустимости нагрузок на среду в целом и на ее отдельные компоненты, о существующих резервах биосферы [1].

Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. определяет экологический мониторинг в РФ как комплексную систему наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. В соответствии с приведенными определениями и возложенными на систему функциями мониторинг включает три основных направления деятельности: наблюдения за факторами воздействия и состоянием среды, оценку фактического состояния среды, прогноз состояния окружающей природной среды и оценку прогнозируемого состояния. Экологический мониторинг представляет собой инструмент экологического регулирования, позволяющий создать информационную базу, необходимую для выполнения задач экологического управления и контроля [2].

Решение задач информационного обеспечения наблюдений за состоянием окружающей природной среды невозможно без применения современных средств измерения и связи, новых компьютерных технологий. Интегрирование всех составных частей мониторинга в единой технологии минимизирует затраты

на их стыковку, сокращает время обмена и преобразования данных, исключает потери информации, повышая тем самым надежность и эффективность создаваемых систем.

Традиционная система экологического мониторинга сегодня включает информационно-измерительную сеть, сеть передачи данных, центр мониторинга и сеть пользовательских, в том числе – мобильных терминалов. Как правило, используются обширные базы картографических данных о территории, средства аналитической поддержки, которые позволяют в реальном времени на основе методов математического моделирования, путем решения прямых и обратных задач переноса составлять карты текущих и прогнозируемых загрязнений контролируемой территории. Современная автоматизированная информационная система должна также обеспечивать своих пользователей эффективными средствами информационного взаимодействия.

В качестве примера системы указанного типа в настоящей статье будем рассматривать программный комплекс «Геоинформационная система мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края» [3, с. 40 – 45].

Объект исследований

Интенсивное развитие нефтедобывающей отрасли на севере Восточной Сибири неразрывно связано с всесторонней информационной поддержкой, начиная с планирования и обеспечения данными анализа и прогноза геологоразведочных работ, бурения и разработки месторождения, и заканчивая ликвидацией нефтегазовых объектов (НГО). Наравне с этим необходимо выполнять экологический мониторинг НГО, который включает в себя сбор актуальных данных о влиянии данного вида антропогенного вмешательства на окружающую природную среду, его негативных воздействиях и возможных последствиях в будущем.

В настоящее время на территории Красноярского края активно проходят геологоразведочные работы, направленные на изыскание новых нефтяных месторождений. Динамично развивается и набирает мощь Ванкорское месторождение, которое находится на севере края, на территории Таймырского Долгано-Ненецкого автономного округа. Существует большое количество уже разведанных нефтегазоносных месторождений, таких как Мессояхское, Пеляткинское, Северо-Соленинское, Южно-Соленинское, Юрубченское и другие, которые находятся на разных этапах развития.

С учетом удаленности нефтегазовых месторождений от краевого центра и от крупных населенных пунктов, труднодоступности территорий в связи с отсутствием соответствующих объектов инфраструктуры, таких как дороги и линии электропередач, актуальными являются задачи удаленного мониторинга таких территорий для получения своевременной, независимой информации о состоянии той или иной характеристики, связанной с нефте- и газоразрабатывающей и добывающей деятельностью. Речь идет не только о характеристиках состояния окружающей природной среды, но и о наблюдении за созданием и развитием объектов инфраструктуры, а также поиском новых месторождений посредством тематического анализа спутниковых изображений.

Всесторонний удаленный мониторинг объектов нефтегазовой промышленности и разрабатываемых территорий позволяет оптимизировать временные и финансовые ресурсы, а также прогнозировать те или иные ситуации, своевременно принимать взвешенные решения, и сокращать риски аварийных ситуаций, таких, как утечка загрязняющих веществ.

Современные ГИС предоставляют огромный спектр инструментов, включающих в себя средства измерений, развитые средства топологического и пространственного анализа, а также инструменты для работы с внешними базами данных. Кроме того, ГИС обеспечивают работу с любыми отчетными материалами, данными дистанционного зондирования земли (аэрофотоснимки, космические снимки, данные сейсмического зондирования и так далее) [4, с. 366 – 376].

Начиная с 2008 г., в Сибирском федеральном университете, при поддержке Министерства природных ресурсов и лесной отрасли Красноярского края ведутся исследования мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли (НГО) Красноярского края. Первоочередные работы были посвящены: характеристике и оценке современного состояния компонентов окружающей природной среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края (первоочередных участках Большехэтского, Юрубчено-Тохомского, Собино-Тэтеринского, Нижнеангарского районов и Таймырского Заполярья); техническим характеристикам объектов НГО, связанных с поиском, разведкой и добычей углеводородного сырья, а также объектов его транспортировки, переработки, хранения и реализации; оценке эффективности действующих систем производственного экологического мониторинга на объектах НГО, уровню подготовки этих объектов к предотвращению аварийных ситуаций и ликвидации их последствий; оценке потенциальных экологических рисков и прогнозу изменений природной среды в районах деятельности объектов НГО; комплексной оценке совокупного воздействия объектов НГО на компоненты природной среды; формированию цифровых карт природных комплексов и объектов, цифровых моделей местности разных масштабов, информационных баз данных.

Совокупность задач, связанных с информационным обеспечением рассматриваемого мониторинга, решается через создание и актуализацию «Геоинформационной системы мониторинга состояния окружаю-

щей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края» (далее – ГИС НГО). Ее можно охарактеризовать как информационно-аналитическую систему, основанную на Интернет- и ГИС-технологиях, в которой предусматривается обработка больших объемов картографической информации, применение эффективных методов анализа данных, визуализация статистических и аналитических данных, сильно изменяющихся в пространстве и времени, с использованием карт и их комбинаций и развитыми средствами доступа к данным [5, с. 166 – 169].

Структура геоинформационной системы

В настоящее время информационное обеспечение ГИС мониторинга состояния окружающей среды состоит из четырех основных функциональных модулей:

- базы данных состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО по результатам наземных наблюдений;
- базы данных состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО по результатам дистанционных наблюдений;
- раздела со вспомогательными материалами мониторинга;
- системного модуля, включающего в себя средства информационного взаимодействия пользователей и подсистему администрирования каталога ресурсов системы (рис. 1).

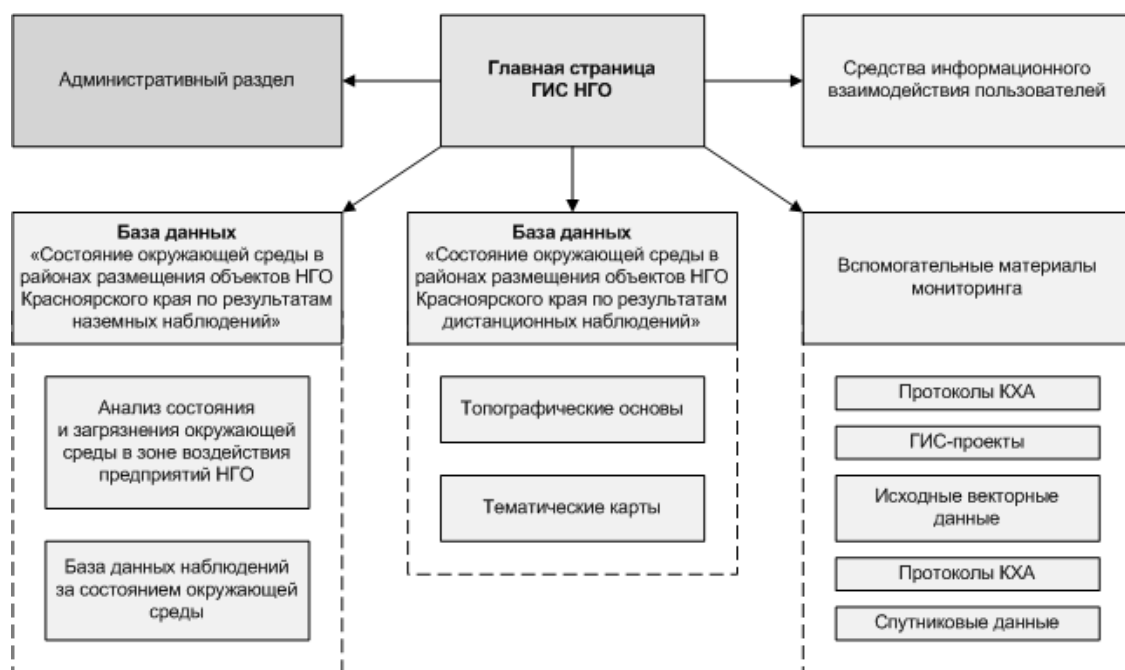


Рис. 1. Общая структура геоинформационной системы

Модуль «База данных состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам наземных наблюдений» содержит два раздела:

- «База данных наблюдений за состоянием окружающей среды», где собраны результаты проведения КХА за 2008-2010 годы по отобранным пробам в районах размещения объектов НГО на территории Красноярского края.
- «Анализ состояния и загрязнения окружающей среды в зоне воздействия предприятий НГО», где представлен инструмент для визуализации многомерных табличных данных результатов проведения КХА за 2008 – 2010 гг. по отобранным пробам в районах размещения объектов НГО Красноярского края, в виде столбчатых диаграмм. Данный инструмент позволяет сравнивать данные по различным этапам и участкам мониторинга, выявлять участки мониторинга, где наблюдаются превышение уровня ПДК.

Модуль базы данных «Состояние окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам дистанционных наблюдений» содержит два раздела:

- топографические основы, где содержатся топографические основы (масштаб 1:100 000 и 1:25000) районов размещения объектов НГО Красноярского края за 2008 – 2010 годы.
- тематические карты, где содержатся результаты дистанционных наблюдений за 2008 – 2010 годы по выявлению нарушений земель и растительности (вырубки леса, гари, изъятые под объекты НГО земли), и загрязнения природной среды (загрязнение поверхностных водных объектов и почвы, несанкционированные свалки отходов).

Модуль «Вспомогательные материалы мониторинга» содержит:

- протоколы результатов химического анализа взятых проб, материалы научных отчетов по проекту;
- исходные векторные данные и спутниковые данные, сгруппированные в ГИС-проекты.

Программно-технологическая основа

В качестве программной основы ГИС НГО используется геоинформационный веб-сервер, модульная архитектура которого позволяет развивать систему уже в процессе её эксплуатации, путём добавления новых средств доступа к данным, а также совершенствования уже существующих средств. Вся разработка выполнена на основе свободного и открытого ПО (free & open source) – как в части ГИС, так и во всех других компонентах разработки [6, с. 116 – 126].

В процессе разработки было создано несколько собственных программных компонентов и библиотек, которые можно использовать (тиражировать) в других проектах. Это элементы пользовательского интерфейса, сервисы работы с геопространственной СУБД, прикладные картографические веб-сервисы, и т. д.

Базовый функционал ГИС НГО обеспечивается средствами программного обеспечения UMN Mapserver и MapGuide Open Source. Также используются геопространственная СУБД PostgreSQL/ PostGIS, системы управления веб-контентом на основе CMS Drupal и вики-системы DokuWiki, целое семейство библиотек построения пользовательского интерфейса и прочих компонентов системы для языков программирования JavaScript, PHP – JQuery, Fusion, TinyMCE, ExtJS, MapScript, и многие другие [7, с. 377 – 386].

Базовыми функциональными компонентами рассматриваемой системы являются:

- база данных характеристик объектов мониторинга;
- каталог информационных ресурсов и пространственных метаданных;
- набор вспомогательных веб-сервисов.

В частности, каталог информационных ресурсов содержит объекты различных типов:

- структурные элементы (организация, сервер, папка);
- элементы системы безопасности (пользователь, роль);
- информационные ресурсы (картографический слой, карта, атрибутивные данные, аналитический сервис с веб-доступом, публикация, и др.);
- элементы классификации информационных ресурсов;
- информационно-навигационные элементы (HTML документы).

Важным модулем системы является «Каталог пространственных метаданных», с помощью которого предоставляется доступ к данным посредством навигации по интерактивному каталогу с развитыми средствами поиска и фильтрации данных. Также было разработано клиентское веб-приложение «Исходные векторные данные», которое обеспечило доступ пользователей к размещаемым в ГИС НГО исходным векторным данным экологического мониторинга в популярных форматах ГИС MapInfo TAB, и проч. (рис. 2).

ГИС НГО обеспечивает пользователя средствами наполнения и редактирования данных и метаданных системы, поиска и классификации картографических ресурсов, веб-сервисами прямого доступа к данным на основе стандартных протоколов WMS/WFS, возможностями аналитической обработки [8, с. 39 – 44].

Серверная часть системы реализована с применением шаблона проектирования MVC (модель-представление-контроллер). Использование данной архитектуры предполагает разделение данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики на три отдельных компонента: модель, представление и контроллер – таким образом, что модификация каждого компонента может осуществляться независимо. В условиях постоянной модернизации системы, непрерывного уточнения технических требований и постановки задачи эти возможности становятся очень актуальными.

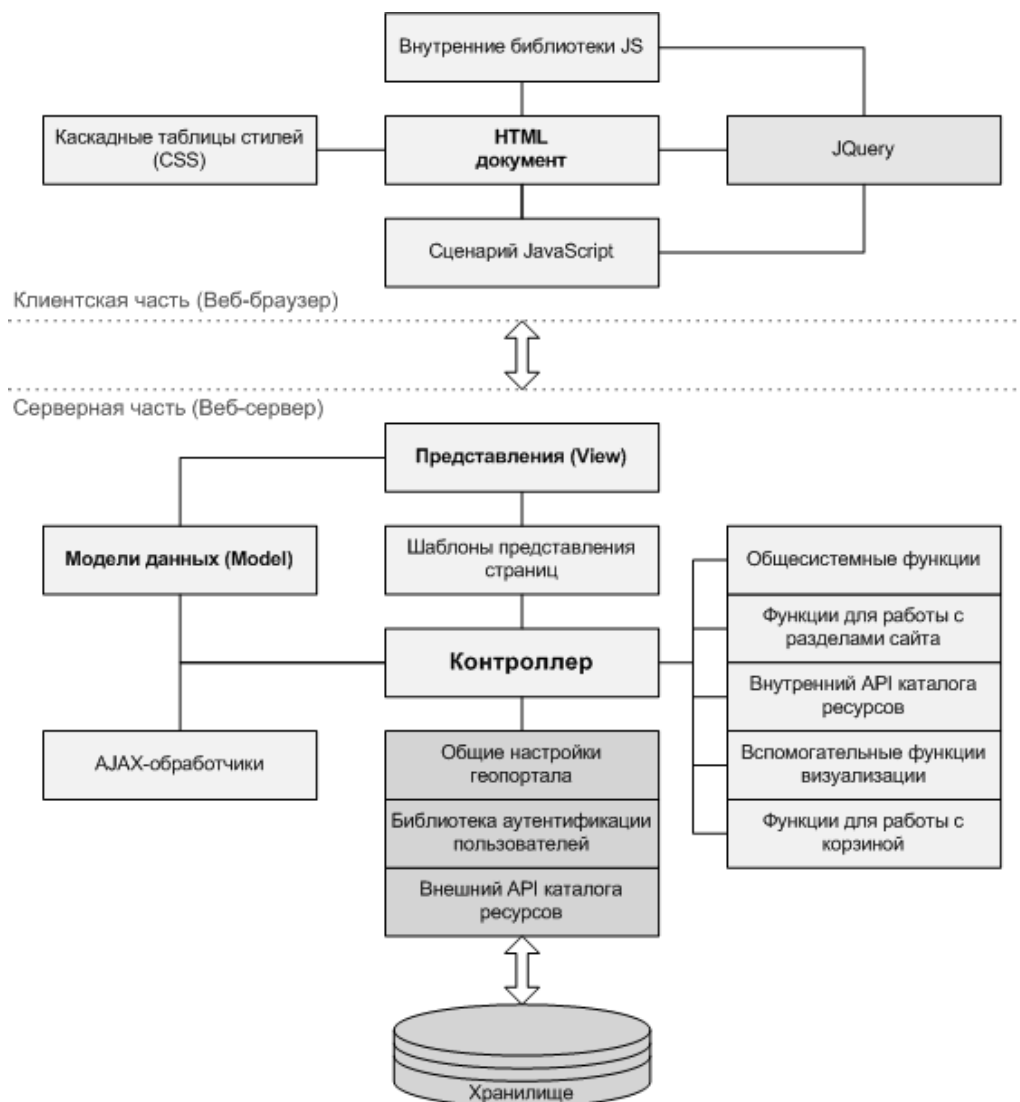


Рис. 2. Общая архитектура платформы клиентской части каталога «Исходные векторные данные»

Информационное наполнение баз данных ГИС НГО

На текущий момент в Базе данных «Состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам дистанционных наблюдений» за 2008 – 2010 годы представлено 52 картографических материала, разделенных на два раздела:

Топографические основы, где содержатся более 30 топографических основ районов размещения объектов НГО Красноярского края за 2008 – 2010 годы. Все данные систематизированы по масштабам (1:100 000 и 1:25 000), каждый масштаб содержит результаты наблюдения систематизированные по годам (рис. 2).

Тематические карты, где содержатся результаты дистанционных наблюдений за 2008 – 2010 годы по выявлению нарушений земель и растительности (вырубки леса, гари, изъятые под объекты НГО земли), и загрязнения природной среды (загрязнение поверхностных водных объектов и почвы, несанкционированные свалки отходов) в соответствии с разделом «Топографические основы».

В Базе данных «Состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам наземных наблюдений» за 2008 – 2010 годы содержит результаты проведения КХА по более 15000 отобраным пробам в зоне воздействия НГО.

В Базе данных «Исходные векторные данные» содержится около 1000 тематических слоев базы данных, собранной за 2008 – 2010 годы.

В разделе Вспомогательные материалы хранятся все протоколы результатов проведенных химических анализов взятых проб, которые сгруппированы по этапам проведения анализов, а так же научно-исследовательские отчеты за весь период выполнения работ.

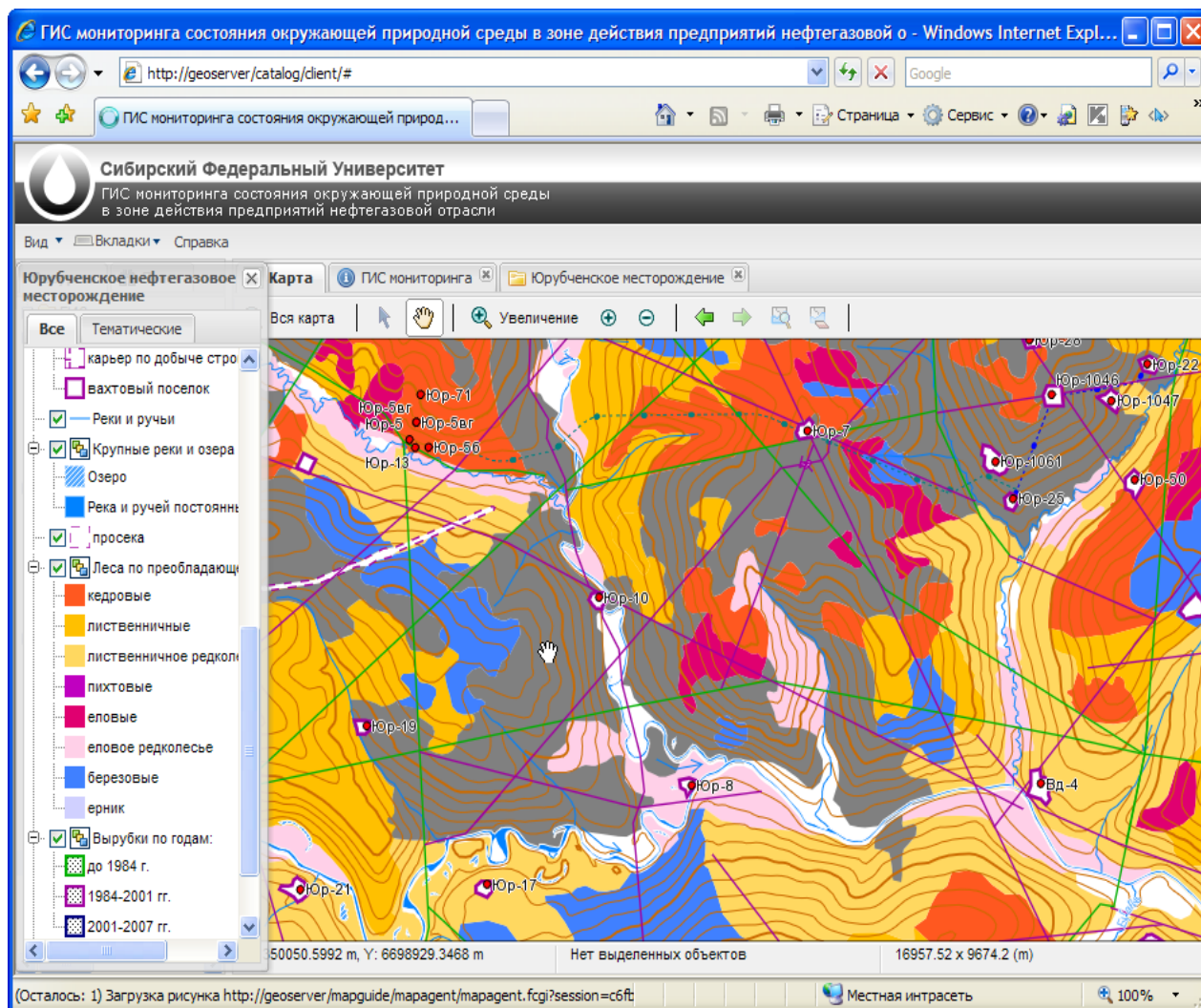


Рис. 3. Картографический веб-интерфейс ГИС НГО

Анализируя накопленный опыт создания систем информационной поддержки наблюдений за состоянием окружающей природной среды, следует отметить, что использование веб-ориентированных решений в этой области – автоматизированных информационных систем, которые изначально спроектированы для работы в сети Интернет, может кардинально повысить эффективность решения природо-охранных задач.

С одной стороны, рассматривая вопросы организации экологического мониторинга – государственного, производственного, общественного, – мы говорим о все возрастающей роли общественности в его проведении, а также – о росте потребности простого и быстрого доступа к исходным данным наблюдений за состоянием окружающей природной среды и результатам их обработки; связано это с социально-политическими тенденциями в обществе. С другой стороны – наблюдается стремительный рост технологий и возможностей Интернет, благодаря которым в последние годы появились и стали очень популярными социальные сети и облачные сервисы, публично доступные спутниковые снимки высокого разрешения, оперативные сводки о погоде и природных явлениях. Также возникло множество информационных ресурсов, кооперативно создаваемых и актуализируемых сообществом пользователей, в том числе – с картографическим содержанием, которое вполне соответствует задачам экологического мониторинга. Объединение этих двух аспектов поможет вывести средства информационного обеспечения задач информационной поддержки наблюдений за состоянием окружающей природной среды на новый уровень.

Литература

1. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
2. Экологический мониторинг: шаг за шагом / Е. В. Веницианов [и др.], под ред. Е. А. Заика. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003. – 252 с.

3. Якубайлик, О. Э. Геоинформационная Интернет-система мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли / О. Э. Якубайлик // Вестник СибГАУ. – 2010. – Т. 1(27).
4. Ерунова, М. Г. Геоинформационное обеспечение задач экологического мониторинга особо охраняемых территорий / М. Г. Ерунова, А. А. Гостева, О. Э. Якубайлик // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2008. – Т. 1. – № 4.
5. Кадочников, А. А. Проблемы реализации Интернет-банка пространственных данных мониторинга состояния окружающей природной среды / А. А. Кадочников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 18.
6. Якубайлик, О. Э. Технологии для геоинформационных Интернет-систем / О. Э. Якубайлик, В. Г. Попов // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14. – № 6.
7. Кадочников, А. А. Формирование геоинформационного Интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов / А. А. Кадочников, В. Г. Попов, А. В. Токарев, О. Э. Якубайлик // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2008. – Т. 1. – № 4.
8. Попов, В. Г. Разработка модели геоинформационной аналитической Интернет-системы для задач мониторинга и анализа состояния региона / В. Г. Попов, О. Э. Якубайлик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Т. 17. – № 12.

Информация об авторах:

Якубайлик Олег Эдуардович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН, доцент кафедры ГИС Сибирского федерального университета, т. 8(391)2426432, oleg@icm.krasn.ru.

Yakubailik Oleg Eduardovich – Candidate of Physics and Mathematics, senior researcher at the Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the RAS, Associate Professor at the Department of Geoinformational Systems of Siberian Federal University.

Гостева Анна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры ГИС Сибирского федерального университета, т. 8(391)2494726, gissfu@gmail.com.

Gosteva Anna Alexandrovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Geoinformational Systems of Siberian Federal University.

Ерунова Марина Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и картографии Красноярского государственного аграрного университета, т. 8(391)2494726, marina@icm.krasn.ru.

Erunova Marina Gennadievna – Candidate of Technical Sciences, Associate professor at the Department of Geodesics and Cartography of Krasnoyarsk State Agrarian University.

Кадочников Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН, т. 8(391)2495382, scorant@icm.krasn.ru.

Kadochnikov Alexey Anatolievich – Candidate of Technical Sciences, researcher at the Institute of Computer Simulation of the Siberian Branch of the RAS.

Матвеев Андрей Геннадьевич – аспирант Сибирского федерального университета, т. 8(391)2495382, andrey.g.matveev@gmail.com

Matveev Andrey Gennadievich – post-graduate student at Siberian Federal University.

Пятаев Алексей Сергеевич – магистрант Сибирского федерального университета, т. 8(391)2495382, pyataev.alex@gmail.com

Pyataev Alexey Sergeevich – Master's programme student at Siberian Federal University.

Токарев Алексей Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН, т. 8(391)2495382, tav@torins.ru

Tokarev Alexey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, researcher at the Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the RAS.

ФИЗИКА

УДК 504.054

**ЭВОЛЮЦИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ОСОБЕННОСТИ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА**
М. А. Битехтина, С. В. Михайлюта, А. А. Леженин, О. В. Тасейко

LAPSE RATE EVOLUTION AND URBAN AIR POLLUTION
M. A. Bitekhtina, S. V. Mikhailuta, A. A. Lezhenin, O. V. Taseiko

По результатам исследования вертикальных профилей температуры и измерений концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы на территории Красноярска выявлены условия формирования экстремально высоких уровней загрязнения и описаны характерные ситуации. Показано, что увеличению уровней загрязнения способствует развитие слоя перемешивания под нижней границей приподнятой инверсии.

By research of lapse rate evolution and urban air pollutant concentrations measurement in Krasnoyarsk territory conditions for extremely high levels of pollution formation are revealed and specific situations are described. It is shown that the increases in levels of pollution are caused by development of a mixing layer under the bottom border of the raised inversion.

Ключевые слова: атмосферный городской пограничный слой, загрязнение атмосферного воздуха города, инверсия температуры

Keywords: urban air pollution, urban boundary layer, lapse rate, high levels of urban air pollution

Наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в городах проводятся для получения информации, необходимой для эффективного управления качеством окружающей среды и здоровья населения. При этом основным фактором, способствующим очищению атмосферы или приводящим к ее экстремально высокому загрязнению, является состояние пограничного слоя атмосферы [1, 2]. Известно, что особо опасное загрязнение приземного слоя атмосферы имеет место, когда над городом развивается приподнятая инверсия, сопровождаемая слабым ветром. При таких условиях, выбросы от источников, расположенных ниже границы инверсионного слоя, циркулируют в нижнем, приповерхностном слое атмосферы.

Целью данной работы является расширение имеющихся представлений об особенностях эволюции городского пограничного слоя атмосферы в контексте загрязнения атмосферного воздуха. Для достижения поставленной цели использовались результаты измерения вертикального профиля температуры и концентрации загрязняющих веществ на территории города Красноярска.

Методы исследования

Особенности эволюции городского атмосферного пограничного слоя исследуются на основе данных микроволнового зондирования [3, с. 678 – 688]. Температурный профилемер МТП-5 позволяет отображать термическую структуру нижнего 600-метрового слоя атмосферы и получать ее временную динамику с достаточным разрешением. Измерения с помощью прибора МТП-5 на территории г. Красноярска проводятся с 2004 года. В работе рассмотрены «характерные ситуации» на примере результатов измерений, выполненных в 2005 году.

В качестве источника данных о концентрации загрязняющих веществ на территории города Красноярска использовались данные стационарных постов мониторинга и результаты непрерывных маршрутных измерений с помощью передвижной газоаналитической лаборатории [4]. Эпизоды загрязнения продемонстрированы на примере изменения концентраций оксида углерода (СО слабо участвует химических реакциях в процессе распространения [2]).

Результаты и обсуждение

Изменение уровня загрязнения атмосферного воздуха обусловлено структурой и режимом выбросов и особенностями метеорологических режимов, которые на территории города обладают значительной временной и пространственной изменчивостью. Зависимость загрязнения воздуха от термической стратификации в наибольшей степени проявляется при слабых ветрах. При умеренных ветрах (около 3 – 5 м/с) с

усилением устойчивости атмосферы загрязнение воздуха снижается, и высокие концентрации примесей наблюдаются при неустойчивой стратификации из-за попадания примесей от высоких источников в нижние слои. При сильных ветрах связь между концентрациями примесей в городском воздухе и вертикальными профилями температуры практически отсутствует. Ниже приведены результаты исследований особенностей загрязнения атмосферы Красноярска для «типичных метеорологических состояний»:

- 1) условия неустойчивого состояния атмосферы с развитым слоем перемешивания и скоростью ветра у земли до 5 м/с в зимнее время;
- 2) условия неустойчивого состояния атмосферы с развитым слоем перемешивания и скоростью ветра у земли до 5 м/с в летнее время;
- 3) условия смены метеорологических режимов с высокими скоростями ветра;
- 4) условия устойчивой атмосферы с низкими скоростями ветра.

Неустойчивое состояние атмосферы в зимний период характеризуется термическим профилем, близким к адиабатическому (рис. 1).

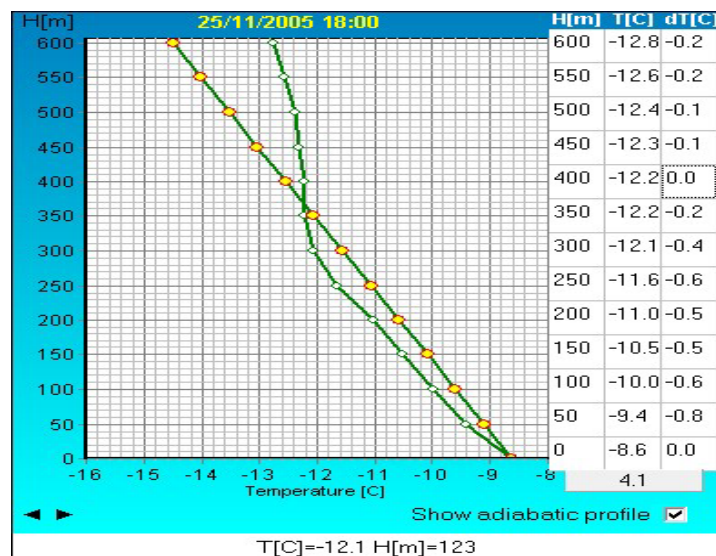


Рис. 1. Высотный профиль температуры над г. Красноярском 25 ноября 2005 г. в 18-00 часов местного времени (неустойчивое состояние атмосферы)

При таких условиях вертикальный обмен в нижнем слое атмосферы происходит достаточно интенсивно, что способствует рассеиванию загрязняющих веществ. Суточная динамика концентрации оксида углерода (CO) для этих условий приведена на рисунке 2.

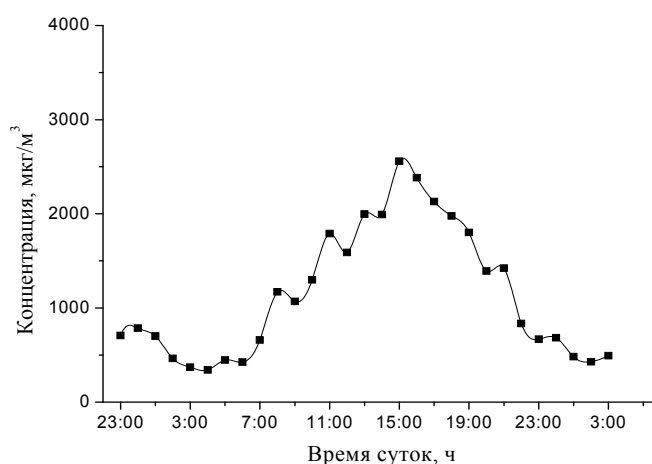


Рис. 2. Суточная динамика концентрации оксида углерода при неустойчивом состоянии атмосферы

Можно видеть, что максимум загрязнения атмосферного воздуха оксидом углерода наблюдается в дневное время, в 15 часов. Такой ход обусловлен тем, что основное количество оксида углерода поступает в воздух с выхлопными газами автомобилей. В ночные часы автотранспорт практически отсутствует на улицах и концентрация CO снижается.

В летний период часто встречаются условия, в которых температурный профиль близок к адиабатическому в дневное время, но ближе к вечеру изменяется, и у поверхности формируется инверсионный слой, который сохраняется до восхода солнца (рис. 3).

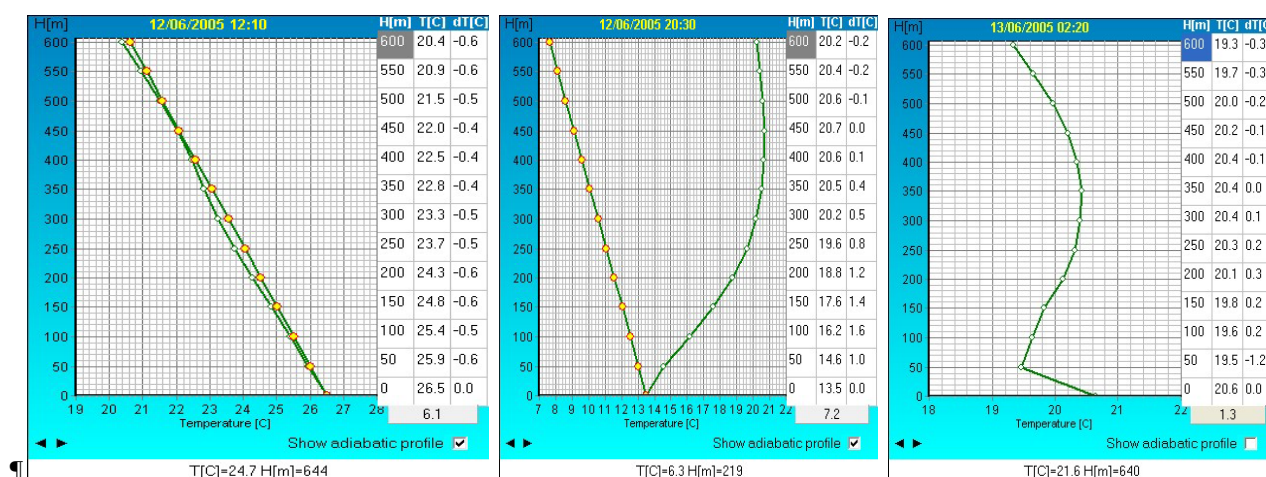


Рис. 3. Высотный профиль температуры над г. Красноярском 12 июня 2005 г. в 12 ч. 10 мин. и в 20 ч. 30 мин. и 13 июня в 2 ч. 20 мин.

Видно, что 12 июня 2005 г. в районе девяти часов вечера температурный профиль характеризуется инверсионным распределением с интенсивностью 7,2 °C и мощностью 450 метров. На рисунке 4 показана суточная динамика концентрации CO для этих условий.

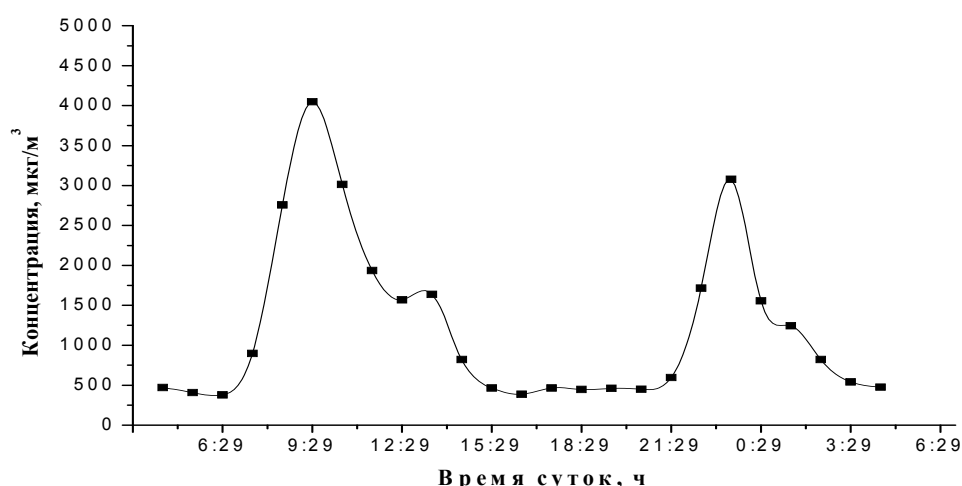


Рис. 4. Характерная суточная динамика концентрации оксида углерода в летний период

Загрязняющие вещества, поступающие в атмосферу города в течение ночи, почти не рассеиваются из-за большой устойчивости. Утром происходит дополнительное увеличение выбросов за счет появления автотранспортных источников, поэтому максимальное содержание примесей в воздухе наблюдается в утренние часы. После восхода солнца происходит разрушение основания инверсии вблизи земной поверхности и увеличение скорости ветра. Несмотря на то, что выбросы от низких источников возросли, теперь они поступают в постепенно увеличивающийся объем воздуха, что приводит к уменьшению уровней загрязнения воздуха до минимума в последующие часы. Вечерний максимум загрязнения связан с усилением устойчивости (формирование приземной инверсии и ослабление ветра).

Следующая характерная картина наблюдается во время смены метеорологических режимов, сопровождающихся высокими скоростями ветра. При таких условиях концентрации загрязняющих веществ принимают малые значения в течение дня и меняются незначительно (рис. 5).

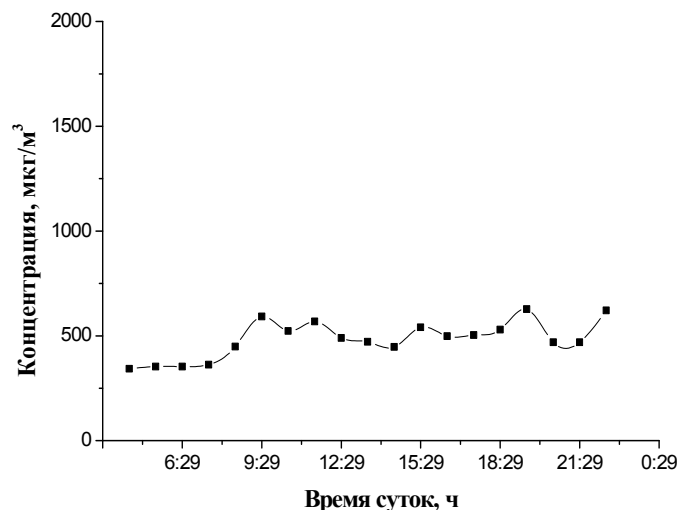


Рис. 5. Характерная суточная динамика концентрации оксида углерода при смене метеорологических режимов

Метеоусловия, при которых наблюдается устойчивая стратификация с низкими скоростями ветра, достаточно часто можно встретить на территории г. Красноярск в зимний период (около 40 % времени). Длительное сохранение инверсии над городом может значительно увеличивать концентрацию загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. Такая ситуация, например, наблюдалась в г. Красноярске с 10 по 16 декабря 2005 года (рис. 6). В этот период над городом наблюдалась устойчивая стратификация температуры, интенсивность инверсии принимала минимальные значения (5°C на начало периода, 10 декабря) в утренние часы и затем постепенно усиливалась к вечеру (до 8°C). Интенсивность приземной инверсии усиливалась и к концу рассматриваемого периода достигла значения 16°C и имела мощность 600 метров. От начала до конца этого периода значения концентрации СО находились на уровне ПДКм.р.

Повышенное содержание примесей в воздухе наблюдается и при сочетании приземной и приподнятой инверсии. Так, например, в период с 10 по 13 января 2005 года над городом существовало инверсионное распределение температуры на высоте 800-1000 метров (данные температурного ветрового зондирования на аэрологической станции Емельяново, индекс ВМО #29570). В это же время в центре города сформировалась приземная инверсия мощностью 500 метров и интенсивностью 8°C (рис. 7).

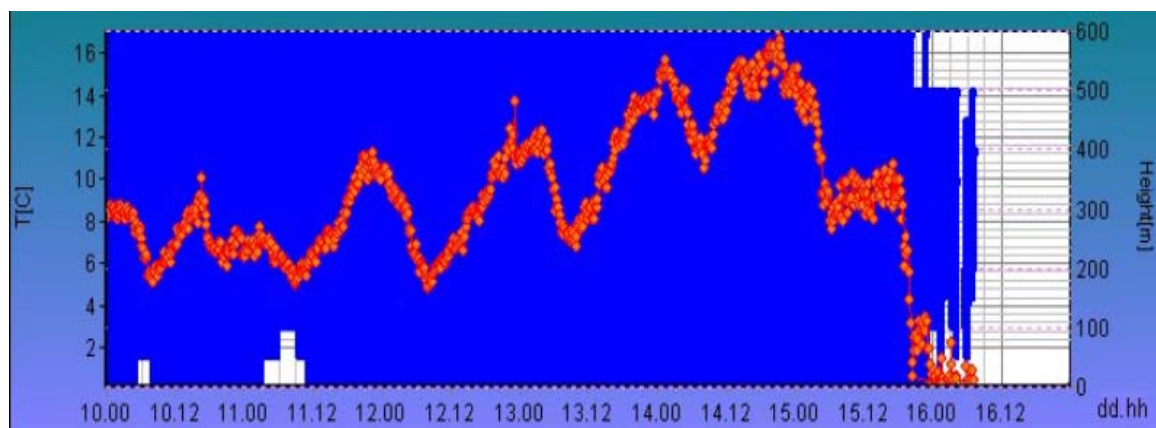


Рис. 6. Интенсивность и мощность инверсии 10-16 декабря 2005 г. над г. Красноярском. По оси абсцисс – число и время наблюдения, по осям ординат – интенсивность (красная кривая, левая шкала) и высота инверсии (закрашенный участок, правая шкала)

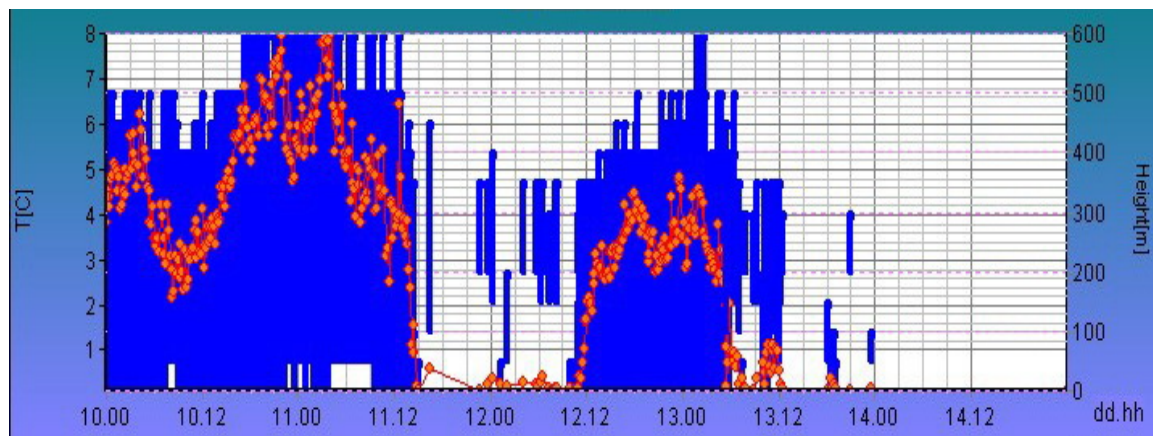


Рис. 7. Интенсивность и мощность инверсии 10-14 января 2005 г. над г. Красноярском.
По оси абсцисс – число и время наблюдения, по осям ординат – интенсивность (красная кривая, левая шкала) и высота инверсии (закрашенный участок, правая шкала)

Такая ситуация сохранялась до 14 часов 11 января, а затем произошло разрушение приземной инверсии, сопровождаемое развитием слоя перемешивания под нижней границей приподнятой инверсии (на высоте 700 метров), которая за это время не претерпевала существенных изменений. Развитие данной ситуации привело к резкому увеличению (в 3 – 5 раз) концентрации основных загрязняющих веществ. Тот факт, что мы наблюдаем развитие слоя перемешивания под нижней границей приподнятой инверсии, подтверждает увеличение концентрации диоксида серы. Так, среднее содержание диоксида серы составляет $0,003 \text{ мг/м}^3$, а в рассматриваемой ситуации концентрация диоксида серы достигала $0,02 \text{ мг/м}^3$.

Закключение

Рассмотренные в работе ситуации не исчерпывают всего многообразия метеорологических явлений и сопутствующих им эпизодам экстремально высокого загрязнения атмосферного воздуха, но уже сейчас позволяют нам получить представление об основных закономерностях эволюции пограничного слоя атмосферы над городом и наметить направление дальнейших инструментальных исследований. Так, понятно, что особое внимание необходимо уделить условиям, в которых может наблюдаться развитие слоя перемешивания под нижней границей приподнятой инверсии. При этом, как было выяснено в ходе проведенных исследований, не всегда достаточно данных, получаемых только с МТП-5, поскольку все результаты, получаемые с этого прибора, ограничиваются высотой 600 метров, в то время как характерные высоты развития инверсионных слоев над территорией г. Красноярска достигают 1000 метров. В дальнейшем исследования метеорологических режимов и потенциала загрязнения атмосферного воздуха должны идти по пути совместного синхронного использования автоматических микроволновых профиломеров и автономных автоматических средств измерения концентраций загрязняющих веществ в различных частях городской территории.

Литература

1. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 271 с.
2. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека // Региональные публикации ВОЗ. Европейская серия. – Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ. – 2001. – № 85. – 293 с.
3. Кузнецова, И. Н. Влияние городской среды на температуру в пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений в Москве и окрестностях / И. Н. Кузнецова, М. Н. Хайкин, Е. Н. Кадыгров // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40. – № 5.
4. Михайлюта, С. В. Динамика загрязнения атмосферы в условиях города / С. В. Михайлюта, О. В. Тасейко, Ю. В. Захаров. – Lambert academic publisher, 2011. – 136 с.

Информация об авторах:

Битехтина Мария Александровна – аспирантка кафедры физики, СибГТУ, т. 8-950-424-16-32, mabitekhtina@gmail.com.

Bitekhtina Maria Aleksandrovna – post-graduate student at the Department of Physics of Siberian State Technological University.

Михайлюта Сергей Владимирович – кандидат технических наук, генеральный директор НП «Центр Прикладной Геоэкологии», ГУ «Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт», т. 8-923-280-47-80, mikhailuta@gmail.com.

Mikhailyuta Sergey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Director of the Centre for Applied Geocology of the Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute.

Леженин Анатолий Александрович – старший научный сотрудник, ИВМиМГ СО РАН, lezhenin@ommfao.sccc.ru.

Lezhenin Anatoliy Alexandrovich – senior researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.

Тасейко Ольга Викторовна – кандидат физико-математических наук, исполнительный директор НП «Центр Прикладной Геоэкологии», доцент кафедры экологии СибГАУ, т. 8-923-280-52-10, taseiko@gmail.com.

Tasejko Olga Viktorovna – Candidate of Physics and Mathematics, Executive Director of the Centre for Applied Geocology, Associate Professor at the Department of Ecology of Siberian State Aerospace University.

УДК 551.521.64; 524.1:550.385

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ МЮОНОВ В АТМОСФЕРЕ И ВЫСОТНЫЙ ХОД ТЕМПЕРАТУРЫ

В. С. Кузьменко, В. Л. Янчуковский, Е. Н. Анцыз

THE DENSITY DISTRIBUTION OF THE TEMPERATURE COEFFICIENT OF MUONS INTENSITY IN THE ATMOSPHERE AND ALTITUDINAL TEMPERATURE VARIATION

V. S. Kuzmenko, V. L. Yanchukovskiy, E. N. Antsyzy

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН: проект 8.2 «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям» в рамках программы № 8 «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика».

Найдено распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере. Исходя из температурной вариации интенсивности мюонов космических лучей, делается оценка температуры различных слоев атмосферы.

The density distribution of the temperature coefficients of the muons intensity in the atmosphere has been found. The estimation of the temperature of different layers of the atmosphere is provided on the basis of a temperature variation in the muons intensity.

Ключевые слова: космические лучи, мюоны, интенсивность, температура, атмосфера.

Keywords: cosmic rays, muons, intensity, temperature, atmosphere.

Известно [2], что наблюдаемые вариации интенсивности мюонов космических лучей (КЛ) в атмосфере являются суперпозицией эффектов различной природы. Они обусловлены изменениями условий, как в межпланетном пространстве, так и в атмосфере Земли (давление, температура, перераспределение масс). Вариации интенсивности мюонов, регистрируемых на уровне h_0 атмосферы в пункте с порогом геомагнитного обрезания R_c обычно [2] представляют в виде выражения

$$\begin{aligned} \frac{\Delta J_m}{J_m}(h_0) = & \left\{ \exp \left[- \int_{h_0}^h \beta_m(h) dh \right] - 1 \right\} + \\ & + \int_0^h w_t(T_0, h_0, h) \Delta T(h) dh + \\ & + \int_{R_c}^{\infty} \frac{\Delta D}{D}(R) W(R, h_0) dR \end{aligned} \quad (1)$$

где $\beta_m(h)$ – барометрический коэффициент интенсивности мюонов, $w_t(T_0, h_0, h)$ – функция плотности температурных коэффициентов, отражающая вклад слоев атмосферы в создании интегрального температурного эффекта интенсивности; $\Delta T(h)$ – временные вариации температуры атмосферы в зависимости от высоты, $\frac{\Delta D}{D}(R)$ и $W(R, h_0)$ – спектр вариаций первичного потока и коэффициенты связи для мюонной компоненты КЛ соответственно. При этом предполагается, что барометрические коэффициенты и плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов КЛ известны. Теоретически рассчитанные значения плотности температурных коэффициентов были получены ранее [3, 4] для наземных мюонных телескопов с экранами, имеющими порог $\Delta\varepsilon \leq 0,4$ ГэВ, и для подземных мюонных телескопов с $\Delta\varepsilon \geq 1,6$ ГэВ. Совершенно очевидно, что для корректного учета метеорологических эффектов интенсивности мюонов следует использовать значения этих параметров, найденные экспериментально.

Оценка метеорологических коэффициентов интенсивности мюонов

Вариации интенсивности мюонов КЛ (1) в то же время можно представить в рамках линейного приближения в виде многофакторного уравнения регрессии, в котором барометрический, температурный эффект и эффект от первичной вариации КЛ выражены через факторы x_1, x_2, x_3, x_4 :

$$Y = A_0 + \sum_{j=1}^4 A_j \cdot X_j + \varepsilon. \quad (2)$$

Результативный фактор y – вариации интенсивности мюонов $\frac{J_{mi} - \overline{J_m}}{\overline{J_m}} \cdot 100 = \delta J_{mi}$,

фактор x_1 – изменения атмосферного давления $h_i - h_0 = \Delta h_i$,

фактор x_2 – изменения температуры слоя переменной массы (приземного слоя)

$$(T_{ni} - \overline{T_n}) \cdot (P_i - 950) = \Delta t_i (P_i - 950),$$

фактор x_3 – изменения среднemasсовой температуры атмосферы $T_{cmi} - \overline{T_{cm}} = \Delta T_{cmi}$,

фактор x_4 – изменения интенсивности нейтронной компоненты, обусловленные изменениями спектра первичного потока КЛ, $\frac{N_i - \overline{N}}{\overline{N}} \cdot 100 = \delta n_i$.

Уравнение (2) было представлено в стандартизованном масштабе, в котором $\hat{y}_i = (y_i - \overline{Y})/\sigma_Y$; $\hat{x}_{ji} = (x_{ji} - \overline{X_j})/\sigma_{X_j}$ ($i = \overline{1, n}$) ($j = \overline{1, m(4)}$) – стандартизованные переменные, а стандартизованные коэффициенты регрессии α_j находились из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} r_{YX_1} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot r_{X_1X_2} + \alpha_3 \cdot r_{X_1X_3} + \alpha_4 \cdot r_{X_1X_4} \\ r_{YX_2} = \alpha_1 \cdot r_{X_2X_1} + \alpha_2 + \alpha_3 \cdot r_{X_2X_3} + \alpha_4 \cdot r_{X_2X_4} \\ r_{YX_3} = \alpha_1 \cdot r_{X_3X_1} + \alpha_2 \cdot r_{X_3X_2} + \alpha_3 + \alpha_4 \cdot r_{X_3X_4} \\ r_{YX_4} = \alpha_1 \cdot r_{X_4X_1} + \alpha_2 \cdot r_{X_4X_2} + \alpha_3 \cdot r_{X_4X_3} + \alpha_4 \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $r_{YX_j}, r_{X_jX_k}$ – коэффициенты парной линейной корреляции между переменными.

Переход от найденных стандартизованных коэффициентов α_j к искомым коэффициентам многофакторной регрессии A_j осуществлялся с помощью соотношения:

$$A_j = \alpha_j \sigma_Y / \sigma_{X_j}. \quad (4)$$

Метеорологические коэффициенты интенсивности мюонов (барометрический A_1 , температурный для приземного слоя A_2 , температурный для среднemasсовой температуры атмосферы A_3), полученные таким образом экспериментально, представлены таблицей для общей ионизирующей компоненты (G.I.) и мюонов

под различными углами к зениту. При этом использовались результаты аэрологического зондирования и данные непрерывных наблюдений мюонной компоненты КЛ в Новосибирске за период 2004 – 2010 гг.

Таблица

Метеорологические коэффициенты интенсивности мюонов

A_j	G.I.	0	30	40	50	60	67	71
$A_1, \%/мб$	-0.175	-0.143	-0.139	-0.142	-0.149	-0.169	-0.233	-0.430
$A_2, \%/^{\circ}C, 10^{-2}$	-0.033	-0.042	-0.047	-0.047	-0.049	-0.050	-0.061	-0.045
$A_3, \%/^{\circ}C$	-0.222	-0.328	-0.313	-0.317	-0.384	-0.308	-0.324	-0.355
A_4	0.375	0.482	0.429	0.397	0.433	0.220	0.267	0.393

Оценка плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов

Было показано [5, с. 110 – 112], что интегральный (от всей атмосферы) температурный эффект интенсивности мюонов может быть представлен как эффект от средневзвешенной по массе температуры атмосферы

$$\Delta T_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i} . \quad (5)$$

Здесь ΔT_i и Δh_i – изменения температуры и масса слоя i атмосферы соответственно. Знание температурного коэффициента интенсивности мюонов от среднемассовой температуры атмосферы A_3 позволяет оценить температурный эффект интенсивности мюонов от всей атмосферы (интегральный): $\left[(J_i - \bar{J}) / \bar{J} \right] \cdot 100 = A_{cm} \cdot \Delta T_{cm}$. Для оценки температурных коэффициентов интенсивности на k изобарах можно также использовать многофакторное уравнение регрессии вида (2) для k факторов, в котором: результативный фактор y – вариации интенсивности $A_{cm} \cdot \Delta T_{cm}$; фактор x_j – изменения температуры на изобаре j $T_{ji} - \bar{T}_j = \Delta T_{ji}$.

Однако ввиду условности разделения атмосферы на отдельные слои очевидна сильная корреляция (не только парная) между значениями температуры на каждом слое, что подтверждают диаграммы рассеяния и расчетные значения коэффициентов парной корреляции. Таким образом, прямое разрешение регрессии не представляется возможным, а методы, такие как гребневая регрессия, дают искусственно зашумленный результат, что является необходимым условием для получения устойчивого решения. В этой связи был использован метод главных компонент [1]. Процедура выделения главных компонент подобна вращению, максимизирующему дисперсию исходного пространства переменных. Метод позволяет получить ортогональные проекции исходных температур на подпространство главных компонент. Таким образом становится возможным прямое разрешение регрессии. Полученные в подпространстве главных компонент температурные коэффициенты с помощью матрицы перехода переводятся в исходное пространство. На рисунке представлены найденные значения плотности температурных коэффициентов интенсивности w_i для общей ионизирующей компоненты и мюонной компоненты под различными углами к зениту в атмосфере.

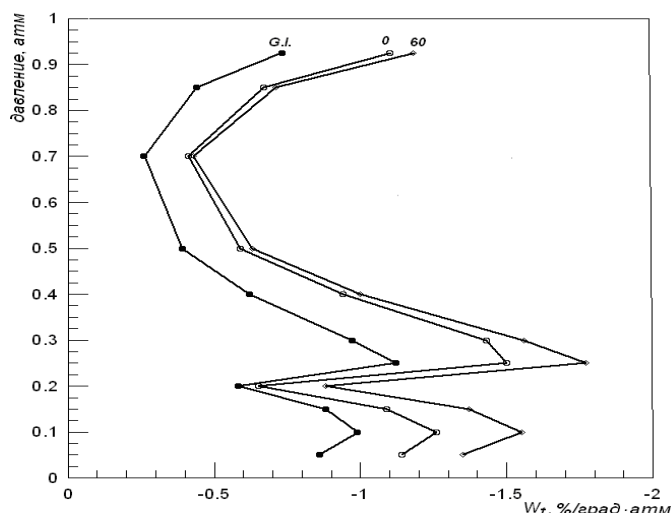


Рис. 1. Распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере

Полученные результаты, с одной стороны, позволяют находить температурную составляющую вариаций интенсивности мюонов, а с другой – получать информацию о температурном режиме атмосферы.

Мониторинг температурного режима атмосферы с помощью космических лучей

Температурная составляющая вариаций интенсивности космических лучей в выражении (1) оценивается по результатам спектрографического анализа вариаций КЛ [5]. Исходя из выделенной температурной составляющей вариаций интенсивности мюонов под различными углами к зениту и используя полученные распределения плотности температурных коэффициентов, сделана оценка изменений температуры различных слоев атмосферы за указанный период (когда число слоев не превышает число каналов регистрации мюонов).

$$\begin{aligned} \delta I_T(h_0, \theta, t) &= \\ &= \alpha_T(\theta) \Delta T_{cm}(t) = \sum_{i=1}^N k_i(\theta) \Delta T_i(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $k_i(\theta) = w_T(h, \theta) \cdot \Delta h_i$, а $w_T(h, \theta)$ – функция плотности температурного коэффициента. Изменения температуры $\Delta T_i(t)$ также находились как

$$\Delta T_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta I_{T,k}(\theta, t) / R_k(\theta), \quad (7)$$

где $\delta I_{T,k}(\theta)$ – температурная составляющая вариации интенсивности мюонов под различными углами к зениту, $R_k(\theta)$ – коэффициенты регрессии для пар значений $\delta I_{T,k}(\theta)$ и ΔT_i слоя i атмосферы, n – число каналов регистрации мюонов под зенитными углами θ . Полученные результаты представлены на рис. 2.

Сплошными линиями на рисунке показаны вариации температуры, найденной по результатам непрерывной регистрации КЛ, точками приведены данные аэрологического зондирования. На рисунке 3 приведены высотные профили температуры атмосферы для различных сезонов года.

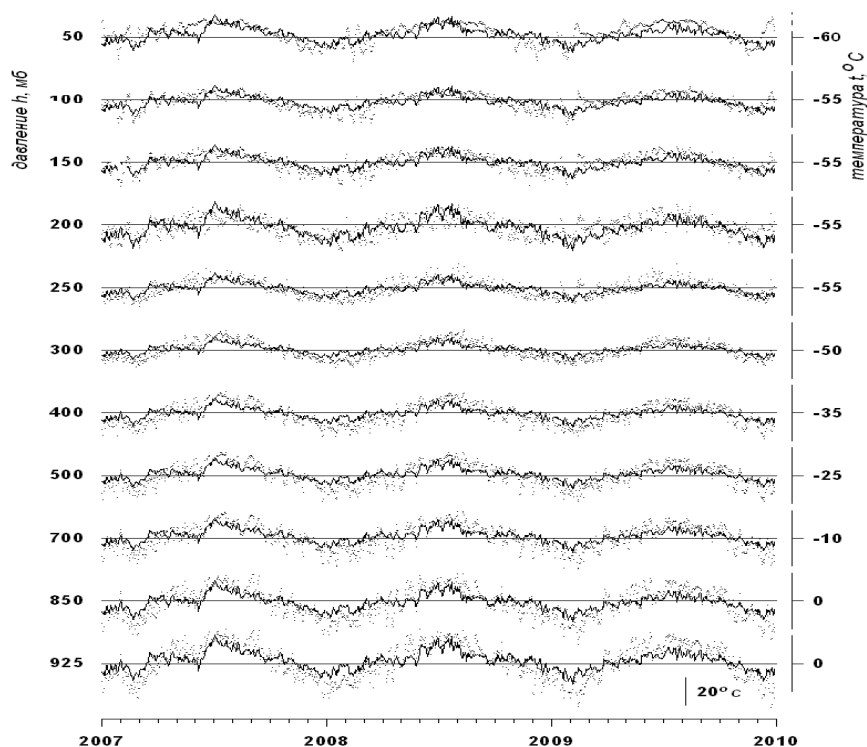


Рис. 2. Вариации температуры атмосферы на различных изобарических уровнях за период 2007 – 2010 гг.

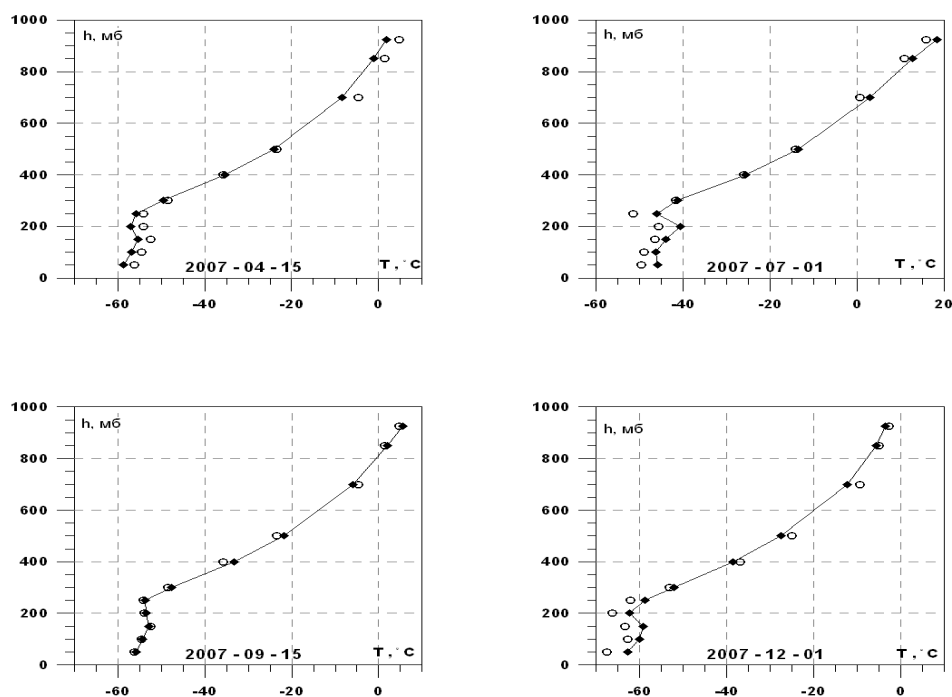


Рис. 3. Высотные профили температуры атмосферы, полученные по данным наблюдений космических лучей (квадратики) и по данным аэрологического зондирования (кружки)

Заключение

Покомпонентная многоканальная непрерывная регистрация космических лучей, с одной стороны, обеспечивают получение информации о вариациях потока первичного излучения в различных областях

энергий, а с другой позволяет проводить мониторинг температурного режима атмосферы в реальном времени.

Литература

1. Айвазян, С. А. Классификация многомерных наблюдений / С. Айвазян, З. И. Бежаева, О. В. Староверов. – М.: Статистика, 1974. – 240 с.
2. Дорман, Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей / Л. И. Дорман. – М.: Наука, 1975. – 462 с.
3. Дорман, Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей / Л. И. Дорман. – М.: Наука, 1972. – 211 с.
4. Кузьмин, А. И. Вариации космических лучей высоких энергий / А. И. Кузьмин. – М.: Наука. 1964. – 159 с.
5. Янчуковский, В. Л. Солнечно-земная физика / В. Л. Янчуковский, В. С. Кузьменко, Е. Н. Анцыз. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2010. – Вып. 16.

Информация об авторах:

Кузьменко Василий Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории (обсерватории) солнечно-земной физики Геофизической службы СО РАН, т. 8(383) 330-24-86, mp3.87@mail.ru.

Kuzmenko Vasiliy Sergeevich – junior researcher at the Laboratory (observatory) of Solar-Terrestrial Physics of Geophysical Survey of the Siberian Branch of the RAS.

Янчуковский Валерий Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Геофизической службы СО РАН, т. 8(383) 330-24-86, vjanch@gs.nsc.ru.

Yanchukovsky Valery Leonidovich – Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory Geophysical Survey of the Siberian Branch of the RAS.

Анцыз Елена Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории (обсерватории) солнечно-земной физики Геофизической службы СО РАН, т. 8(383) 330-24-86, anzis@gs.nsc.ru.

Antsyz Elena Nikolaevna – junior researcher at the Laboratory (observatory) of Solar-Terrestrial Physics of Geophysical Survey of the Siberian Branch of the RAS.

УДК 532.5, 536.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ГАЗА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В STAR CMM+

И. А. Куксов, В. Д. Сарычев, С. П. Мочалов, В. И. Карпенюк

EXPLORING THE SWIRL GAS FLOW IN CYLINDRICAL CHAMBER BY NUMERICAL MODELING IN STAR-CCM+ SOFTWARE

I. A. Kuksov, V. D. Sarychev, S. P. Mochalov, V. I. Karpenok

Работа выполнена в рамках проекта № 2010-218-02-174 по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

В статье представлена методология численного моделирования газодинамических процессов в вихревой камере, приведены характеристики расчетной сетки, описаны использованные физические модели. Приводятся результаты численного расчета закрученного течения газа, индуцированного двухрядным коллектором в цилиндрической камере.

The paper describes methodology for numerical simulation of gas-dynamics processes in swirl chamber. Characteristics of computational mesh and used physical models are provided. The paper provides results of numeric calculations for swirl gas flow in cylindrical chamber induced by two-row gas header.

Ключевые слова: закрученные потоки, вихревая камера, моделирование газодинамики.

Keywords: swirl flows, vortex chamber, computational fluid dynamics.

В настоящее время появилось большое число работ, в которых приводятся результаты расчетов физико-химических процессов на фоне сложных гидродинамических течений [1 – 5]. Математическому моделированию течения в вихревых камерах посвящены работы [6 – 7], где использовались специфические для рассматриваемых там случаев геометрии и параметров. Для исследования процессов, происходящих при сжигании водо-угольного топлива, в условиях СибГИУ создана и используется адиабатическая вихревая камера, состоящая из цилиндрической емкости, коллектора – восьми сопел, собранных по четыре в ряд (рис. 1, а).

Цель данной работы заключается в определении трехмерного поля скоростей газа при заданном расходе через коллектор. Получение представления о характере течения в рабочем пространстве вихревой камеры важно, поскольку позволит выбрать параметры работы топки, обеспечивающие оптимальное перемешивание и подвод реагентов при сжигании в топке топлива.

Радиус внутреннего пространства камеры составляет 0,7 м. В коллектор воздух подается с расходом, изменяющимся в пределах от 600 до 900 м³/час. При диаметре сопла коллектора $d = 29$ мм скорость на срезе входного канала составляет 40 м/с, а числа Рейнольдса $Re = 10^4$ и Маха $M = 0,13$. Это означает, что из каналов коллектора истекают турбулентные дозвуковые струи.

Расчет газодинамических процессов, протекающих в вихревой камере, осуществлялся с помощью программного пакета STAR-CCM+ (версия 6.02), разработанного компанией CD-adapco. В расчетах применяются нестационарные осредненные, по Рейнольдсу, уравнения Навье-Стокса с $k - \epsilon$ моделью турбулентности для вязкого совершенного газа.

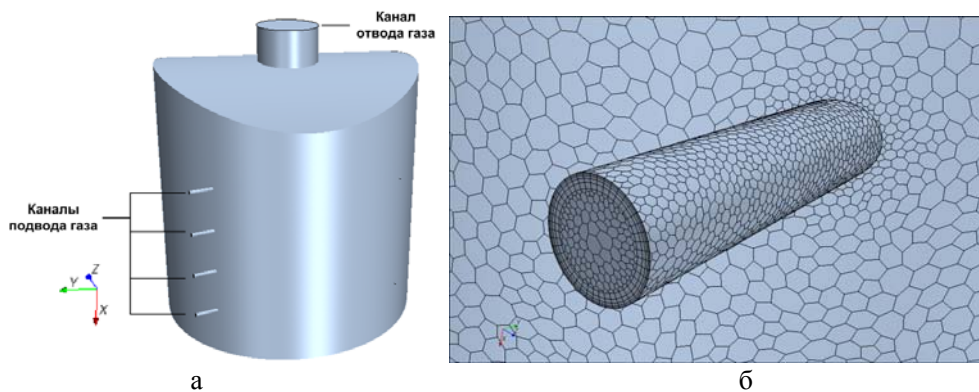


Рис. 1. К постановке задачи: а – схема вихревой камеры, б – фрагмент расчетной сетки

Граничные условия заданы в соответствии с параметрами вихревой камеры. На входной границе – срезах каналов коллектора, задан массовый расход и угол между направлением скорости и нормалью, равный 75°. Выходная граница для расчетной области – канал отвода продуктов горения, расположенный в верхней части камеры. Ось x направлена вдоль оси камеры (рис. 1, а), а оси y, z лежат в плоскости перпендикулярной вертикальной оси камеры.

Для численного решения поставленной математической задачи используется метод конечного объема, который является основным в пакете STAR CMM+. Шаг по времени для данного расчета выбран равным 0,01 с. Метод расчета – неявный. Параметры расчетной сетки следующие: сетка многогранная; базовый размер ячейки сетки – 0,005 м; количество пристеночных призматических слоев – 2; коэффициент сжатия пристеночных слоев – 1,5; количество ячеек объемной сетки – 1 272 732. Построение расчетной сетки и разбиения на ячейки происходит автоматически. Как показал дальнейший расчет, выбранные параметры сетки (базовый размер, количество пристеночных слоев и т. д.) являются достаточными для получения стационарного решения поставленной газодинамической задачи. Фрагмент сеточного разбиения приведен на рис. 1,б, где представлены призматические слои вблизи внутренней поверхности подводящего канала.

Для контроля сходимости к стационарному решению использовалась проверка закона сохранения массы путем сравнения массовых расходов газа на входных и выходной границах. Закон сохранения массы при общем массовом расходе (через 8 сопел) равном 0,26 кг/с выполнялся с абсолютной ошибкой равной 0,0062 кг/с и относительной ошибкой 2,4 %.

Кроме того, анализировались невязки полной энергии и компонентов вектора импульса в норме L_2 . Для нормализации невязок использовался встроенный в пакет STAR-CCM+ механизм автоматической нормализации, который вычисляет коэффициент нормализации на основании максимальной величины измеряемого параметра за первые 5 итераций. Величина относительной невязки по энергии составила 0,1 %, максимальная невязка по модулю импульса не превышала 0,5 %.

На рис. 2 изображены изолинии модуля скорости в вертикальном сечении, которое перпендикулярно линии, соединяющей пары противоположащих сопел. Как видно из рисунка, наибольшие значения модуля скорости достигаются по ходу струй.

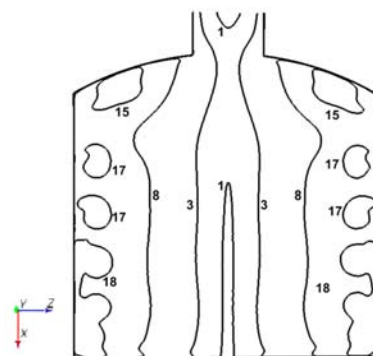


Рис. 2. Изолинии модуля скорости в осевом (вертикальном) сечении, м/с

На рис. 3,а представлены изолинии модуля скорости в плоскости y, z (плоскость сечения проходит через нижнюю пару сопел). Направление тангенциального потока – против часовой стрелки. Максимальные значения скорости (40 м/с) достигаются на срезах сопел (область вблизи входного отверстия представлена на рис. 3, б).

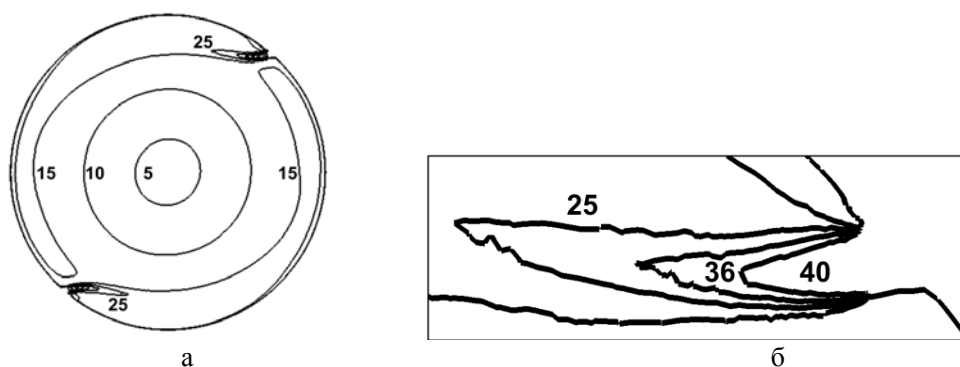


Рис. 3. Изолинии модуля скорости в сечении, перпендикулярном оси x , м/с (а – общий вид, б – увеличенный фрагмент вблизи сопла)

На рис. 4 изображено векторное поле скоростей в горизонтальном сечении, проходящем через нижнюю пару сопел.

Как видно из представленных рисунков, в камере, благодаря тангенциальному подводу воздуха, образуется вертикальный вихрь, ось которого проходит через центр основания камеры.

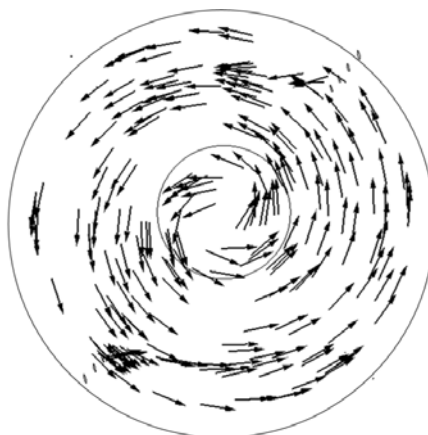


Рис. 4. Векторное поле скоростей

Для более детального описания течения в вихревой камере необходимо обратиться к распределению скоростей вдоль радиуса. Зависимости распределения скоростей от радиуса вдоль различных направлений

(в горизонтальных плоскостях, проходящих через сопла) представлены на рис. 5. В описании графиков используется нумерация противоположащих пар сопел снизу вверх (нижнему ряду присвоен номер 1 и т. д.).

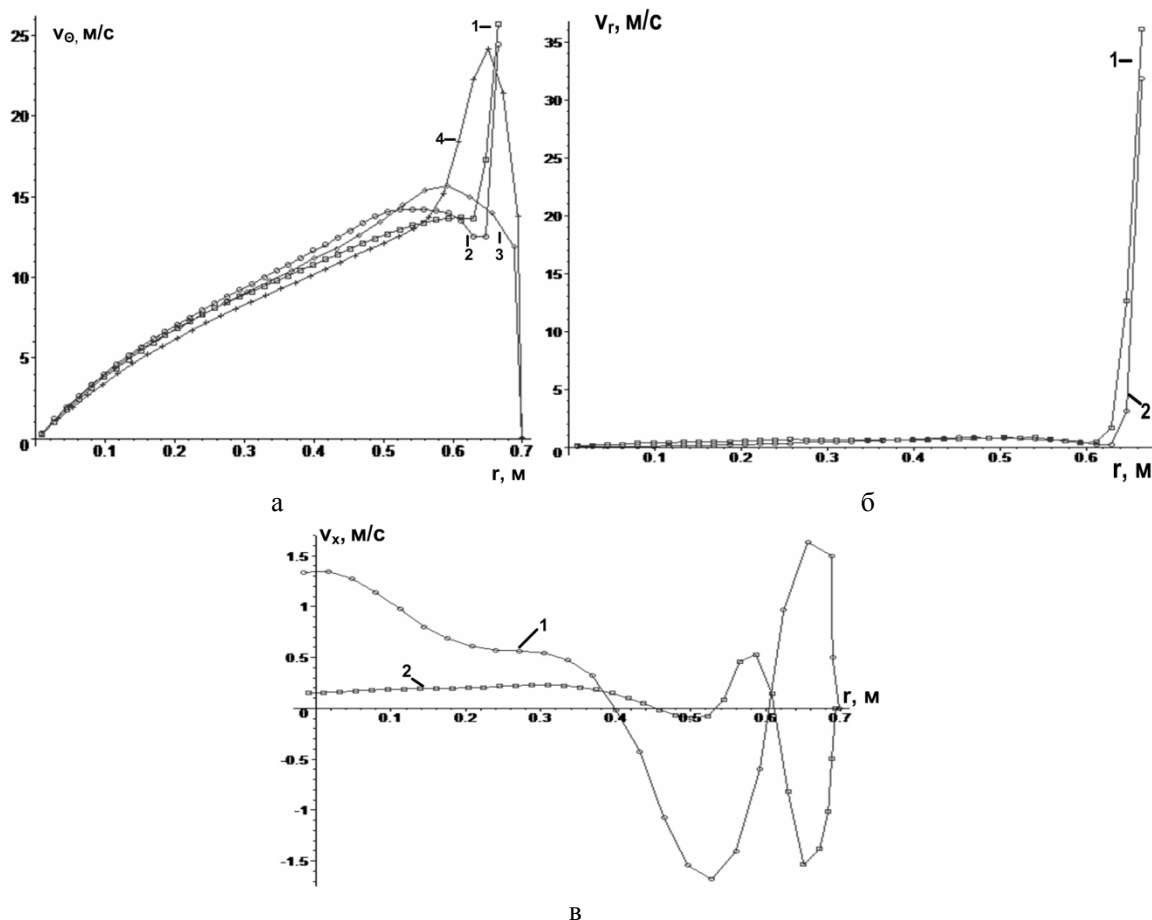


Рис. 5. Зависимости распределения скоростей от радиуса:

- а) зависимость тангенциальной скорости от радиуса для различных направлений:**
 1, 2 – вдоль линий, соединяющих первую пару сопел (1) и третью пару сопел (2);
 3, 4 – вдоль линий, перпендикулярных линиям, соединяющим первую пару сопел (3) и третью пару сопел (4);
- б) зависимость радиальной скорости от радиуса:**
 1 – вдоль линии, соединяющей первую пару сопел;
 2 – вдоль линии, соединяющей третью пару сопел;
- в) зависимость осевой скорости от радиуса для различных направлений:**
 1 – вдоль линии, соединяющей третью пару сопел;
 2 – вдоль линии, перпендикулярной линии, соединяющей третью пару сопел.

На рис. 5, а приведена серия зависимостей тангенциальной скорости от радиуса, относящихся к линиям, проведенным через сопла (1, 2), и вне сопел (3, 4) на разных расстояниях от дна камеры. Из приведенных зависимостей следует, что в пределах изменения радиальной координаты от нуля до $\sim 0,6$ м тангенциальные скорости изменяются одинаково вдоль различных сечений. В пределах изменения радиуса от 0,6 до 0,7 м характер зависимости тангенциальной скорости от радиуса меняется: в сечениях через сопла (1,2) скорости становятся равными ~ 25 м/с, а скорости в сечениях вне сопел (3,4) обращаются в ноль, что соответствует условию прилипания.

Зависимости радиальной скорости от радиуса вдоль линий, проходящих через сопла, показаны на рис. 5, б. Из этих зависимостей видно, что эти скорости близки нулю вплоть до радиуса 0,6 м, а вблизи стенки камеры возрастают до 35 м/с.

Зависимости осевой скорости (вдоль вертикальной оси камеры) от радиуса для различных направлений указаны на рис. 5, в (на данном графике положительное направление оси ординат совпадает с направлением от дна камеры к выходному каналу в ее своде). Эти зависимости имеют сложный характер, поскольку присутствуют возвратные течения. Вблизи оси камеры течение направлено вверх, что позволяет говорить о наложении вращательного и осевого течения.

Литература

1. Волков, К. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
2. Ахметов, В. К. Численное моделирование вязких вихревых течений для технических приложений / В. К. Ахметов, В. Я. Шкадов. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 176 с.
3. Юн, А. А. Теория и практика турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений. – М.: URSS, 2009. – 272 с.
4. Бубенчиков, А. М. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах / А. М. Бубенчиков, А. В. Старченко. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – 236 с.
5. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. – М.: Физматлит, 2010. – 288 с.
6. Бутырев, А. Е. Математическое моделирование течения газа в вихревых камерах с тангенциальным вдувом / А. Е. Бутырев, М. П. Галанин, В. Г. Гнеденко [и др.] // Препринты Института прикладной математики. – 2007. – № 85. – 27 с.
7. Анохина, Е. С. Моделирование стационарных вихревых структур в модельной камере сгорания // Труды XVIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКФС-18. – Красноярск, 2012.

Информация об авторах:

Куксов Игорь Анатольевич – младший научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ, т.: 8-905-908-12-17, saget@inbox.ru

Kuksov Igor Anatolievich – junior researcher at the Office of Scientific Research of Siberian State Industrial University.

Сарычев Владимир Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры физики СибГИУ, т.: 8-951-597-35-31, sarychev_vd@physics.sibsiu.ru

Sarychev Vladimir Dmitrievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics of Siberian State Industrial University.

Мочалов Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор, ректор СибГИУ, т.: (3843) 46-35-02 rector@sibsiu.ru

Mochalov Sergey Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Siberian State Industrial University.

Карпенко Виктор Иванович – старший научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ, т.: 8-961-717-74-19, vkarpенок@mail.ru

Karpenok Viktor Ivanovich – senior researcher at the Office of Scientific Research of Siberian State Industrial University.

УДК 535.333

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ КОЛЕБАНИЙ КАРБОНИЛЬНЫХ ГРУПП В КРОКОНОВОЙ КИСЛОТЕ Б. П. Невзоров, Е. В. Салтанова, А. С. Сухих, Ю. А. Фадеев

SPECTROSCOPIC RESEARCH OF INTERMOLECULAR INTERACTION IN CROCONIC ACID B. P. Nevzorov, E. V. Saltanova, A. S. Sukhih, Y. A. Fadeev

В статье исследуется внутримолекулярный резонанс между карбонильными связями в кроконовой кислоте методом ИК спектроскопии. Установлено, что расщепление частот валентных колебаний обусловлено одновременным воздействием внутри- и межмолекулярным резонансом между карбонильными группами кроконовой кислоты.

The article describe intramolecular resonance between the carbonyl bonds in croconic acid by the use of IR spectroscopy. It has been established that the splitting of stretching vibrations frequencies is caused intra- and intermolecular resonance simultaneous between the carbonyl groups of croconic acid.

Ключевые слова: кроконовая кислота, водородная связь, ИК-спектр, резонансное взаимодействие.

Keywords: croconic acid, hydrogen bond, infrared spectrum, resonant interaction.

Образование межмолекулярных водородных связей в твердых телах может привести к возникновению сетчатых структур различной конфигурации [6]. В твердых телах такие структуры являются устойчивыми и обладают элементами симметрии. Образование молекулярных сеток зависит от наличия в молекуле фрагментов с донорными и акцепторными свойствами. К таким веществам, в частности, относится кроконовая кислота.

Кроконовая кислота (4-циклопентен – 1, 2, 3-трион, 4,5-дигидрокси, ($C_5H_2O_5$)), представляет собой цикlopентен с двумя гидроксильными группами, присоединенными к атомам углерода, между которыми имеется двойная связь, и тремя кетонowymi группами, присоединенными к трем другим атомам углерода (рис.1).

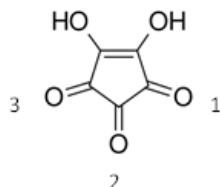


Рис. 1. Молекула кроконовой кислоты с пронумерованными карбонильными связями

Как видно из рис.1, молекула кроконовой кислоты обладает двумя группами – донорами протонов (О-Н) и тремя акцепторными группами (С = О). В кристаллическом состоянии между молекулами кроконовой кислоты присутствует сильная межмолекулярная водородная связь. Вraga D. и сотрудники [10] методом дифракции рентгеновского излучения установили, что в кристаллическом состоянии каждая молекула кроконовой кислоты связана с четырьмя другими молекулами, а межмолекулярные связи осуществляются двумя независимыми видами водородных связей, расположенных в разных кристаллографических плоскостях (рис. 2). Одна из связей образует цепь линейных водородных связей А-В-А-В и С-Д-С-Д почти параллельно полярной оси *c*. Другая связь А-Д-А-Д и В-С-В-С идет зигзагом в направлении оси *c* [9].

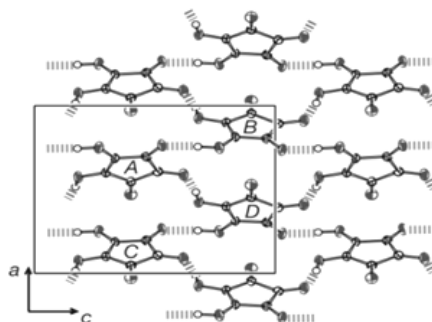


Рис. 2. Водородные связи в кристаллической кроконовой кислоте [9]

Межмолекулярные водородные связи образуют тетрамолекулярные кольца из молекул кроконовой кислоты (рис. 2) [11]. Тетрамолекулярные кольца формируют полосы, которые располагаются по типу «аккордеон», образуя угол между полосами $68^\circ - 69,9^\circ$ (рис. 3) [12].



Рис. 3. Пространственное расположение молекул кроконовой кислоты, показывающее структуру типа «аккордеон»

Такое расположение полос приводит к возрастанию разницы энергии протонов в водородной связи, что делает водородные связи более асимметричными, чем в неполярных системах с водородными связями [17]. По каждой полосе происходит перенос двух протонов к карбонильным группам от смежных молекул.

Bisti F [10] отмечает, что такая передача протона и происходящее одновременно переключение π – связи может полностью изменять полярность кристалла.

Как известно, одним из эффективных методов по изучению межмолекулярного взаимодействия является ИК-спектроскопия [3]. Исследованию водородной связи спектроскопическими методами ранее были посвящены многочисленные обзоры и монографии [4,5,13,18]. Накопленный десятилетиями экспериментальный материал позволил выявить несколько основных закономерностей поведения спектральных полос, относящихся к колебаниям молекулярных фрагментов, участвующих в образовании водородного мостика. В частности, возникновение водородной связи в кислотах приводит к частотному понижению полосы валентных колебаний гидроксильной связи на несколько сотен см^{-1} и понижению частоты валентных колебаний карбонильной связи на несколько десятков см^{-1} . Отнесение колебательных полос в ИК-спектрах может быть затруднен из-за различных эффектов. Одним из них является внутримолекулярный резонанс, возникающий в случае наличия в молекуле взаимодействия одинаковых фрагментов [7].

Цель настоящей работы заключалась в изучении внутримолекулярного резонанса между карбонильными связями в кроконовой кислоте спектроскопическими методами.

В [16] были получены ИК спектры кроконовой кислоты в кристаллическом состоянии и в метаноле (рис 4). Из сравнения спектров авторы [9] сделали вывод, что наблюдается незначительное отличие в форме и положении полос поглощения вследствие чувствительности молекулы кроконовой кислоты к ее окружению. Две полосы поглощения с максимумами 1722 и 1756 см^{-1} соответствуют колебаниям карбонильных групп. Широкая полоса поглощения от 3500 до 2000 см^{-1} соответствует Н-связи. Полосы поглощения расположенные между 1700 и 1500 см^{-1} соответствуют продольным колебаниям группы $\text{C}=\text{C}$; продольные колебания $\text{C}-\text{O}$ наблюдаются на частоте 1070 см^{-1} .

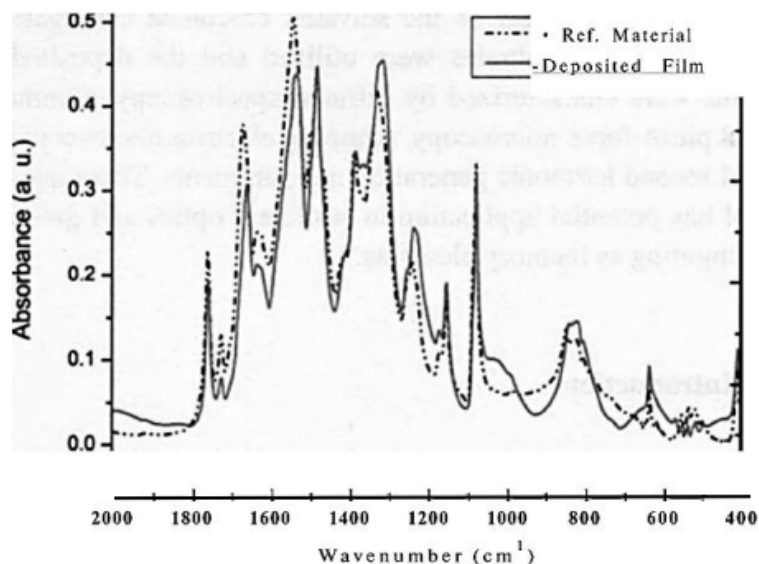
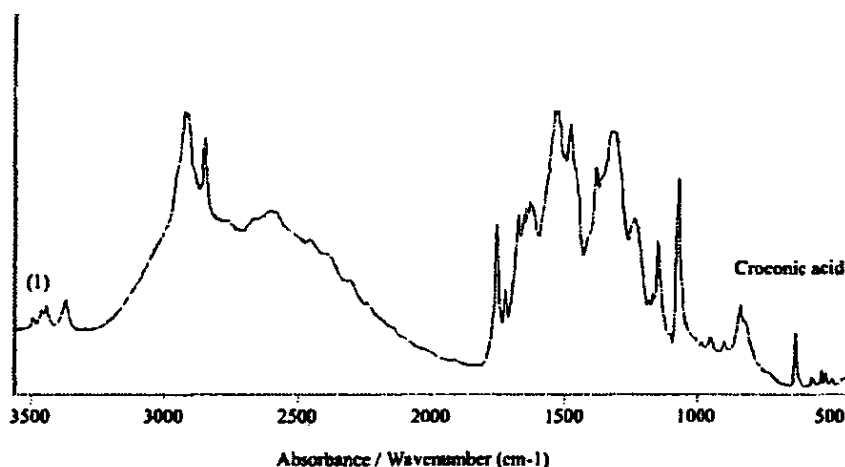


Рис. 4. ИК спектры кроконовой кислоты и кроконовой кислоты в метаноле [7]

В [15] приведены результаты теоретических расчетов ИК спектра, а также неполяризованный и линейно поляризованные спектры кроконовой кислоты. Теоретические расчеты частот ИК спектра проводились с учетом пространственного строения молекулы. Теоретические расчеты показали, что в спектре могут присутствовать линии поглощения 3617 и 3582 см^{-1} , первая из которых соответствует валентному колебанию свободной ОН группы, второе – внутримолекулярной водородной связи ОН группы. Частоты валентных колебаний групп $\text{C}=\text{O}$ равны: 1781 см^{-1} $\text{C}=\text{O}^2$, 1764 см^{-1} симметричное валентное колебание $\text{C}=\text{O}^1$, 1703 см^{-1} – антисимметричное валентное колебание $\text{C}=\text{O}^3$ (нумерация атомов кислорода приведена на рис. 1). Частоты 800, 560 и 510 см^{-1} , согласно вычислениям соответствуют колебаниям атомов углерода перпендикулярным плоскости кольца. Валентные колебания сильной водородной связи проявляются в неполяризованном спектре кроконовой кислоты в виде широкой полосы поглощения 3300 – 2000 см^{-1} (рис. 5). В области частот 1800 – 1500 см^{-1} наблюдаются две полосы поглощения 1755 и 1721 см^{-1} , соответствующие валентным колебаниям $\text{C}=\text{O}$. Наблюдаемое различие в частотах валентных колебаний $\text{C}=\text{O}$ (26 и 43 см^{-1}) между теоретическими и экспериментальными значениями можно объяснить участием $\text{C}=\text{O}$ группы в образовании межмолекулярной водородной связи.



Non-polarized IR-(1) spectra croconic acid.

Рис. 5. Неполаризованный ИК (1) спектр кроконовой кислоты [15]

В настоящей работе для регистрации ИК-спектра использовались поликристаллы кроконовой кислоты с чистотой 98 %. ИК-спектры регистрировались на ИК фурье-спектрометре ФСМ 1202 фирмы Инфраспек (Россия). Перед записью спектра кристаллический порошок кроконовой кислоты тщательно растирался в агатовой ступке и перемешивался с бромидом калия в соотношении 1,0: 100,0 мг. Полученную смесь при комнатной температуре прессовали в таблетку на гидравлическом прессе под давлением 8000 кг/см^2 и дополнительным вакуумированием для дополнительной сушки образца. ИК- спектр регистрировался в диапазоне $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ с разрешением $0,5 \text{ см}^{-1}$, стандартным отклонением 0,103 и отношением сигнал/шум 5,248. Обработка спектров производилась с использованием программного обеспечения Fspres.

ИК-спектр кроконовой кислоты представлен на рис. 6.

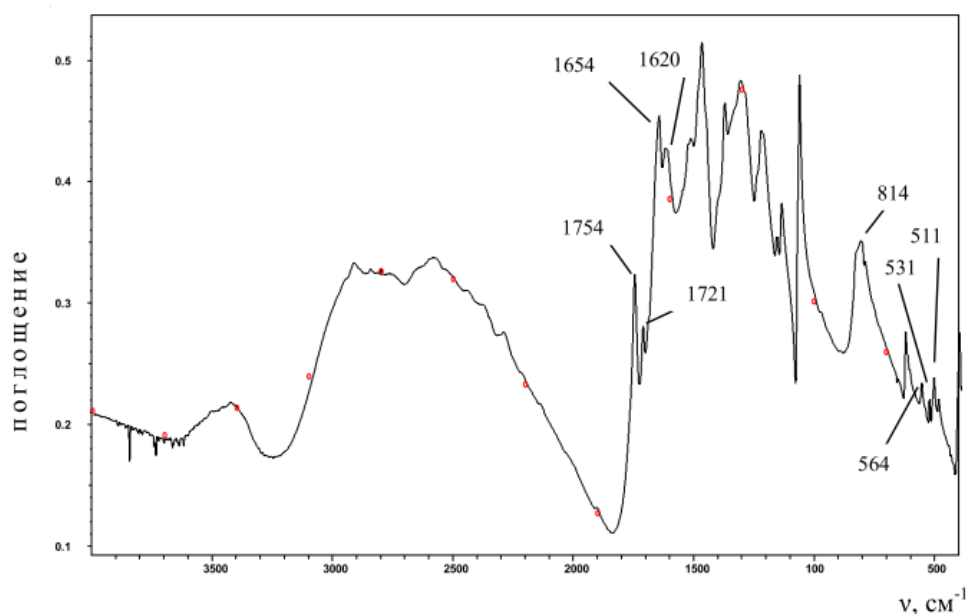


Рис. 6. ИК-спектр поглощения кроконовой кислоты при комнатной температуре

Сравнительный анализ ИК-спектров кроконовой кислоты полученных в работах [15, 16] приведен в таблице.

Таблица

Сравнительный анализ ИК-спектров кроконовой кислоты.

Вид колебаний	ν , см ⁻¹ [16]	ν , см ⁻¹ [15] calculated IR-spectra	ν , см ⁻¹ [15] non-polarized IR- spectra	ν , см ⁻¹ данные на- стоящей ра- боты
C = O валентные колебания	1722	1781 C=O ²		
	1756	симметричное валентное колебание C = O ¹		
		1764	1755	1754 1654
		антисимметричное валентное колебание C = O ³		
		1703	1721	1721
ОН группа валентные колебания	3500 – 2000	3617 свободная ОН группа 3582 внутримолекулярная водо- родная связь ОН группы	3300 – 2000	3200 – 1900
ОН группа Деформационные колебания		522		531,6
C = C	1700 1500	1800 – 1500	1633	
колебания атомов С перпен- дикулярные плоскости кольца		800 560 510		800 565 511

Энергия водородной связи в кислотах составляет от 4 до 10 ккал/моль. Такой энергии достаточно для возникновения ассоциаций молекул в жидком и даже в парообразном состоянии вещества. В твердых телах Н-связь может оказывать влияние на формирование структуры кристалла. В ИК-спектрах присутствие двух и более C = O связей проявляется в виде нескольких полос, которые относятся к валентным симметричным $\nu_s(C=O)$ и антисимметричным $\nu_{as}(C=O)$ колебаниям. Данные полосы являются характеристическими по частоте и расположены в узком интервале спектра от 1650 до 1750 см⁻¹. Расщепление частот $\Delta\nu = \nu_{as}(C=O) - \nu_s(C=O)$ зависит от различных факторов, среди которых присутствуют как стерические, так и динамические факторы. К стерическим факторам можно отнести такие, как расстояние между карбонильными связями в молекулах, а также значение угла между ними. Очевидно, что, если угол между карбонильными связями составляет 90°, то их колебания практически не влияют друг на друга. В то же время компланарность карбонильных групп приводит к их наибольшему взаимодействию. Степень взаимодействия C=O существенно уменьшается по мере выхода этих связей из компланарного состояния [1]. Таким образом, анализируя величину расщепления $\Delta\nu = \nu_{as}(C=O) - \nu_s(C=O)$ в спектрах кроконовой кислоты, можно судить об изменении геометрии молекул и внешних факторах, влияющих на динамические характеристики карбонильной связи.

Возникновение ассоциаций молекул с Н-связями, в кислотах, присутствие двух и более C = O связей, например в димерах, проявляется в виде нескольких полос, которые относятся к валентным симметричным $\nu_s(C=O)$ и антисимметричным $\nu_{as}(C=O)$ колебаниям. В работе [8] проведенные исследования бензойной кислоты при матричной изоляции в Ar (T = 13 K) показали, что в димере взаимодействие между C = O связями приводит к расщеплению валентных колебаний карбонильных групп на 2 – 3 см⁻¹. Расщепление между компонентами, вызванное снятием вырождения, можно наблюдать только при условии, что ее величина сопоставима со значениями полуширин компонент (критерий Релея). Последнее условие выполняется при криогенных температурах. Усложнение спектра может возникнуть при наложении двух видов резонансных взаимодействий кратных связей. Во-первых, резонансное взаимодействие осуществляется через водородную связь в надмолекулярных структурах и, во-вторых, резонанс может произойти благодаря внутримолекулярному взаимодействию подобных связей. Поскольку энергия водородной связи ~ 10 раз меньше энергии химической связи, то следует ожидать, что величина расщепления компонент в основном обусловлена за счет внутримолекулярного взаимодействия.

Рассмотрим взаимодействие двух карбонильных групп (1 и 3 рис.1) в молекуле кроконовой кислоты при условии, когда они не участвуют в Н-связи. Валентным колебаниям этих групп соответствуют полосы

с частотами 1754 см^{-1} и 1721 см^{-1} . Расщепление $\Delta \nu = \nu_{as}(C=O) - \nu_s(C=O)$ составляет 33 см^{-1} . Карбонильным группам, участвующим в водородных связях по схеме, приведенной на рис.2, соответствуют полосы с частотами 1654 см^{-1} и 1620 см^{-1} . Примечательно, что расщепление и в этом случае составляет 34 см^{-1} . Необходимо отметить, что разница в расщеплении частот валентных колебаний карбонильных групп участвующих и не участвующих в Н-связи составляет $\sim 1 \text{ см}^{-1}$.

Таким образом, в последнем случае незначительное увеличение величины расщепления обусловлено одновременным воздействием внутри- и межмолекулярным резонансом между карбонильными группами.

Взаимодействия между валентными колебаниями карбонильных групп, в ассоциации молекул кроконовой кислоты можно рассматривать как взаимодействия аналогичных групп в полимерной цепи. Для цепи со свободными концами при взаимодействии ближайших N соседей уравнения движения N осцилляторов можно записать в виде [2]

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = k(-x_1) + k'(x_2 - x_1) \\ \dots\dots\dots \\ m\ddot{x}_r = k'(x_{r-1} - x_r) + k(-x_r) + k'(x_{r+1} - x_r) \\ \dots\dots\dots \\ m\ddot{x}_N = k'(x_{N-1} - x_N) + k(-x_N) \end{cases} \quad (1)$$

здесь x_r - смещение r -го осциллятора от положения равновесия. В гармоническом приближении решение уравнений записывается выражением

$$x_r = x_{r,0} e^{i\omega t} \quad (2)$$

Используя следующие обозначения: $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ - частота невозмущенного осциллятора, $\omega'^2 = \frac{k'}{m}$ - пара-

метр взаимодействия осцилляторов, k - силовая постоянная связи, k' - константа связи осцилляторов, и подставляя (2) в (1), получаем

$$\begin{cases} (B+1)x_1 + x_2 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ x_{r-1} + Bx_r + x_{r+1} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ x_{N-1} + (B+1)x_N = 0 \end{cases} \quad (3)$$

здесь

$$B = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega'^2} \quad (4)$$

Приравнявая вековой определитель системы однородных уравнений (3) к нулю и решая его, получаем уравнения вида:

$$\frac{2 \sin N\theta(1 + \cos \theta)}{\sin \theta} = 0, \quad (5)$$

где связь между θ и B определяется выражением

$$2 \cos \theta = B. \quad (6)$$

Уравнение (5) имеет N решений вида:

$$\theta_s = \frac{s\pi}{N}, \quad s = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (7)$$

Из уравнений (4), (6), (7) частоты колебаний определяются выражением:

$$\omega_s^2 = \omega_0^2 + 4\omega'^2 \sin^2 \frac{d\vec{k}}{2}, \quad (8)$$

здесь d - расстояние между двумя осцилляторами, $\vec{k}$ - волновой вектор. Из выражения (8) следует, что расщепление частот составляет не более 4 см^{-1} , что хорошо согласуется с полученными экспериментальными данными.

Таким образом, анализируя величину расщепления $\Delta \nu = \nu_{as}(C=O) - \nu_s(C=O)$ в спектрах кроконовой кислоты можно судить об изменении геометрии молекул и внешних факторах, влияющих на динамические характеристики карбонильной связи.

Литература

1. Беллами, Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул / Л. Беллами. - М. : Мир, 1971. - 318 с.
2. Збинден, Р. Инфракрасная спектроскопия высокополимеров / Р. М. Збинден. - М. : Мир, 1966. - 355 с.

3. Межмолекулярные взаимодействия от двухатомных молекул до биополимеров / под ред. Б. Пюльман. – М. : Мир, 1981. – 592 с.
4. Пиментел, Дж. Водородная связь / Дж. Пиментел, О. Мак-Келлан. – М. : Мир, 1964. – 462 с.
5. Применение длинноволновой ИК-спектроскопии в химии / А. Финч, П. Гейтс, К. Редклиф [и др.]. – М.: Мир, 1973. – 284 с.
6. Проявление кооперативного эффекта в молекулярных двумерных кристаллах с водородными связями / Н. А. Даурцева, Б. П. Невзоров, Е. В. Салтанова, Ю. А. Фадеев // Вестн. КемГУ. – 2011. – № 1. – С. 151 – 155.
7. Сечкарев, А. В. Спектроскопическое изучение взаимодействия связанных парциальных осцилляторов в симметричных молекулах на примере динитрилов / А. В. Сечкарев, Ю. А. Фадеев // Журн. прикладной спектроскопии. – 1992. – Т. 56. – № 1. – С. 138 – 141.
8. Фадеев, Ю. А. Исследование самоассоциаций карбоновых кислот в низкотемпературной матрице аргона с помощью ИК-спектров / Ю. А. Фадеев, А. В. Сечкарев // Оптический журн. – 2000. – Т. 67. – № 1. – С. 29 – 34.
9. Above-room-temperature ferroelectricity in a single-component molecular crystal / S. Horiuchi, Y. Tokunaga, G. Giovannetti et al. // Nature – 2010. – Vol. 463. – P. 789 – 792.
10. Bisti, F. Fingerprints of the hydrogen bond in the photoemission spectra of croconic acid condensed phase: an x-ray photoelectron spectroscopy and ab-initio study / F. Bisti, A. Stroppa, S. Picozzi, L. Ottaviano // Chem. Phys. – 2011. – V. 134 (17):174505.
11. Braga, D. Crystallization from hydrochloric acid affords the solid state structure of croconic acid (175 years after its discovery) and a novel hydrogen-bonded network / D. Braga, L. Maini, F. Grepioni // Cryst. Eng. Comm. – 2001. – V.6. – Is. 3. – P. 27 – 29.
12. Braga, D. Croconic acid and alkali metal croconate salts: some new insights into an old story / D. Braga, L. Maini, F. Grepioni // Chem. Eur. J. – 2002. – V. 8. – Is. 8. – P. 1804 – 1812.
13. Defining the hydrogen bond: An account (IUPAC Technical Report) / E. Arunan, G. R. Desiraju, R. A. Klein et al. // Pure Appl. Chem. – 2011. – Vol. 83 – № 8. – P. 1619-1636.
14. Horiuchi, S. Hydrogen-bonding molecular chains for high-temperature ferroelectricity / S. Horiuchi, R. Kumai, Y. Tokura // Advanced Materials – 2011. – Vol. 23. – P. 2098 – 2103.
15. Kolev, T. Solid-state linear polarized IR-spectroscopy of croconic and rhodizonic acids / T. Kolev, B. Koleva, M. Spiteller // European Journal of Chemistry. – 2008. – V. 6. – № 3. – P. 393 – 399.
16. O'Malley, S. M. Matrix-assisted pulsed laser deposition of croconic acid, a diprotic organic ferroelectric / S. M. O'Malley, Yi. Sun Yong, R. Jimenez // Applied Physics A Materials Science & Processing. – 2011. – V. 105 – № 3. – P. 635 – 641.
17. Seliger, J. Nuclear Quadrupole resonance study of hydrogen bonded solid materials. //Acta Chim. Slov. – 2011. – V. 58. – P. 471 – 477.
18. Steiner, T. The Hydrogen Bond in the Solid State // Angew. Chem. Int. Ed. – 2002. – № 41. – P. 48 – 76.

Информация об авторах:

Невзоров Борис Павлович – доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой современного естествознания КемГУ, т. 8(3842) 58-13-01, nevzorov@kemsu.ru.

Невzorov Boris P. – Doctor of Pedagogics, Professor, a Head of Department of Modern Natural Sciences of KemSU.

Салтанова Елена Владимировна – старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики и высшей математики КемГМА, т. 8(3842) 54-91-30, pediatr@kemsma.ru.

Saltanova Elena V. – Senior Lecturer of the Department of Medical and Biological Physics and Higher Mathematics of Kemerovo State Medical Academy.

Сухих Андрей Сергеевич – кандидат фармацевтических наук, доцент, старший научный сотрудник Центральной научно-исследовательской лаборатории КемГМА, т. 8(3842)72-10-18, kemsma@kemsma.ru.

Sukhih Andrey S. – candidate of pharmaceutical science, associate professor, senior staff scientist at the center research laboratory Kemerovo State Medical Academy.

Фадеев Юрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математики КузГТУ, т. 8(3842) 39-63-18, uaf49@yandex.ru.

Fadeev Yuriy A. – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, a Head of Mathematics department of Kemerovo State Technical University.

ХИМИЯ

УДК 662.61

МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ СУСПЕНЗИОННОГО ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ВИХРЕВОЙ ТОПКЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА *Л. А. Ермакова, С. П. Мочалов, С. Н. Калашников, А. А. Пермяков*

MECHANISM OF COAL-WATER FUEL DROPS COMBUSTION IN THE SWIRL BURNER OF AN AUTOMATED ENERGY GENERATING COMPLEX *L. A. Ermakova, S. P. Mochalov, S. N. Kalashnikov, A. A. Permyakov*

Работа выполнена в рамках проекта № 2010-218-02-174 по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства».

В статье рассмотрен механизм горения капель суспензионного водоугольного топлива, предложена физико-химическая схема процесса, состоящая из нескольких независимых параллельно-последовательных стадий. Предложенный механизм горения капель подтверждается гранулометрическим анализом и стереомикроскопическим исследованием продуктов горения.

The article describes the mechanism of coal-water fuel drops combustion and proposes the physico-chemical scheme of the process that comprises several independent parallel-sequential stages. The proposed mechanism of drops combustion is verified by the size analysis and the microscopic study of the combustion products.

Ключевые слова: отходы углеобогащения, суспензионное водоугольное топливо, механизм горения, вихревая топка.

Keywords: waste coal, coal-water fuel, mechanism of combustion, swirl burner

В настоящее время наряду с добычей быстрыми темпами развивается обогащение угля. Неизбежным результатом процесса обогащения является получение отходов – мелких частиц угля и минеральных включений. Значительное количество отходов углеобогащения накоплено и складывается на обогатительных фабриках, что загрязняет окружающую среду. Одним из способов утилизации отходов углеобогащения является их сжигание в вихревой топке автоматизированного энергогенерирующего комплекса в виде водоугольной суспензии (ВУТ) [1, С. 36 – 39], что позволяет не только использовать весь добытый уголь для получения тепла, но и решает экологические проблемы угледобывающих регионов.

Для разработки технологии сжигания ВУТ в вихревой топке автоматизированного энергогенерирующего комплекса требуется изучить механизм горения капель суспензионного водоугольного топлива.

Механизм горения капель ВУТ. При описании процесса горения водоугольного топлива необходимо учитывать основные отличия процесса воспламенения и горения капли суспензии от горения пылевидного твердого топлива. Для описания процесса горения капель ВУТ можно предложить следующую физико-химическую схему процесса, состоящую из нескольких независимых параллельно-последовательных стадий (рис. 1):

- *на поверхности капли* – мгновенный прогрев и поверхностное испарение влаги, низкотемпературная активация реакционной поверхности топлива перед его воспламенением, горение микрочастиц угля на поверхности капли;

- *внутри капли* – постепенный прогрев капли, испарение влаги из внутренней области капли, выход летучих и горение летучих около капли ВУТ, перенос микрочастиц угля к поверхности капли с образованием ксеносферы (полной сферы), горение микрочастиц угля в результате химической реакции с кислородом воздуха и водяным паром.

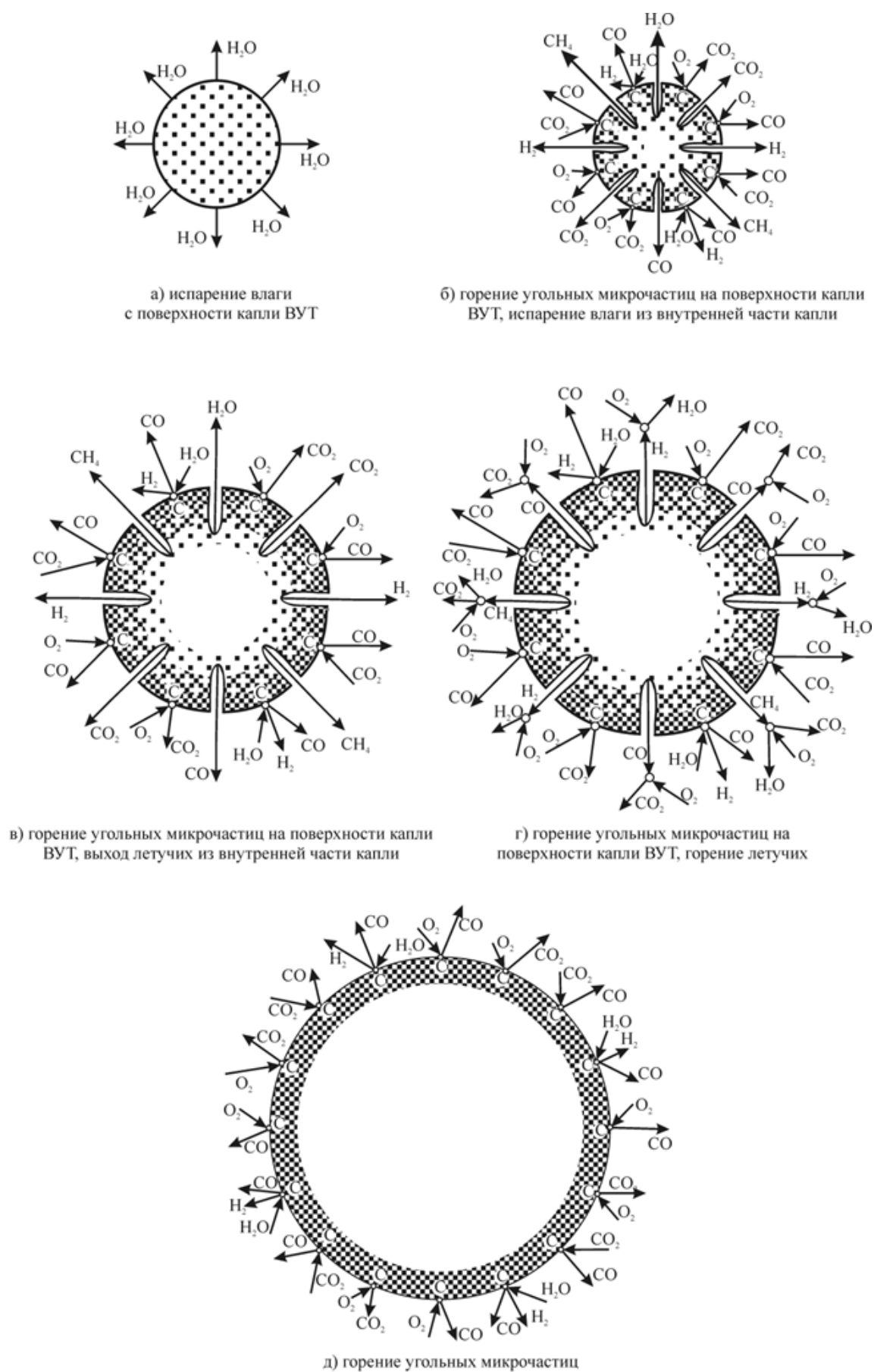


Рис. 1. Физико-химическая модель горения ВУТ

При попадании капли ВУТ в горячую топочную камеру происходит практически мгновенный прогрев поверхности капли и испарение влаги с поверхности капли. Внутри капли происходит её постепенный прогрев, и с повышением температуры начинается процесс испарения влаги из внутренней области капли. Процесс испарения влаги описывается следующим уравнением:



При повышении температуры поверхности капли начинается процесс термической деструкции (пиролиза) органической массы на поверхности капли ВУТ, сопровождающийся выделением летучих веществ. При продвижении температурного фронта вглубь капли начинается процесс выхода летучих веществ из внутренней области капли. Основными уравнениями, описывающими выход летучих, являются следующие:



За счет водяного пара, образующегося при испарении влаги с поверхности, происходит низкотемпературная активация угольных микрочастиц на поверхности капли ВУТ до их воспламенения, что приводит к существенному снижению температуры воспламенения ВУТ. В процессе горения летучих происходит нагрев капли и воспламенение коксового остатка микрочастиц угля на её поверхности. На поверхности протекают реакции горения за счет взаимодействия углерода с кислородом воздуха, водяными парами и CO_2 , полученным как от выхода летучих, так и от горения летучих и коксовой основы топлива. Горение происходит по следующим реакциям:



Процесс горения на поверхности капли ВУТ происходит параллельно с процессами испарения влаги и выхода летучих из глубины капли. В ходе процесса испарения влаги и выхода летучих осуществляется вынос микрочастиц угля из глубины капли к ее поверхности, результате чего капля ВУТ превращается в полую сферу.

Гранулометрический анализ водоугольного топлива и продуктов его горения. Для проведения исследования применяли лазерный анализатор размеров частиц Mastersizer 2000 (Malvern, Великобритания). В таблице 1 приведен результат экспериментального исследования гранулометрического состава ВУТ, полученного из отходов угольного производства ЦОФ шахты «Антоновская» и двух проб пыли, отобранных в вихревом пылеуловителе в ходе эксперимента по сжиганию ВУТ в вихревой адиабатической топке.

Таблица 1

Распределения частиц ВУТ и по размерам

Диапазон размеров, мм		0,00002-0,00025	0,00025-0,00071	0,00071-0,00200	0,00200-0,00564	0,00564-0,01589	0,01589-0,04478	0,04478-0,12619	0,12619-0,35566	0,35566-2,000
Объем частиц, %	ВУТ	0	0,65	2,25	7,36	20,35	33,65	29,16	6,47	0
	Зола (проба №1)	0	0	0	0,11	6,56	43,02	41,32	8,31	0,7
	Зола (проба №1)	0	0	0	1,21	8,95	20,55	39,06	28,18	2,06

Оценка для плотности распределения $f(d)$ частиц по размерам на основе экспериментальных данных строится в классе регулярных распределений в интервале $(d_{\min}, d_{\max})$ в виде логарифмически нормального закона распределения с учетом минимального и максимального диаметров частиц $d_{\min}$ и $d_{\max}$.

$$f(d) = \frac{\lambda(d_{\max} - d_{\min})}{(d_{\max} - d)(d - d_{\min})\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\ln\left(\frac{d_{\max} - d}{d - d_{\min}}\right) - \ln a\right)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где λ, a, σ – параметры распределения.

Конкретный вид $\tilde{f}_m(d)$ определяется значениями параметров λ^*, a^* и σ^* , которые минимизируют функционал:

$$\Phi(\lambda^*, a^*, \sigma^*) = \min_{\lambda, a, \sigma} \sum_{i=1}^{N_\phi} (f(d_i) - S_i)^2, \quad (5)$$

где N_ϕ – количество фракций соответствующего вещества;

d_i – размер частиц в i -ой фракции, мм;

S_i – доля i -ой фракции, %.

Полученные при обработке экспериментальных данных значения параметров плотности распределения частиц по размерам для ВУТ и продуктов его горения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры плотностей распределения частиц ВУТ и золы по размерам

Материал	$d_{\min}$, мм	$d_{\max}$, мм	λ	a^*	σ^*
ВУТ	0,00028	0,31698	0,611	2,555	1,177
Зола (проба № 1)	0,00448	0,63246	0,703	7,668	0,846
Зола (проба № 2)	0,00317	2,00000	1,701	8,194	1,011

На рис. 2 приведены экспериментальные данные распределения частиц ВУТ и золы по размерам и полученный при обработке график плотности распределения в виде уравнения (5). При этом размер частиц расположен по логарифмической шкале.

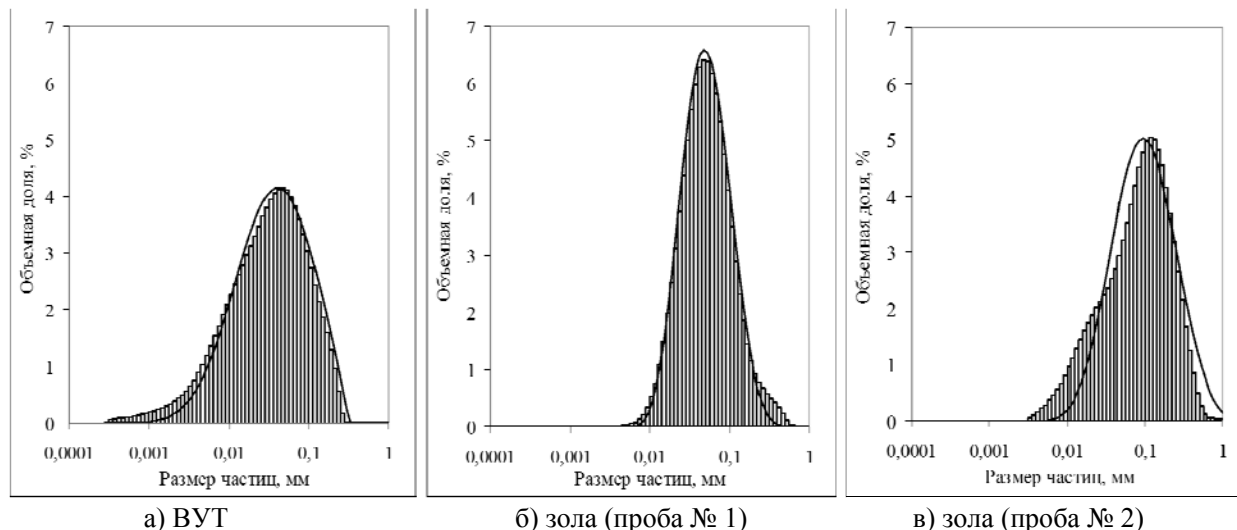
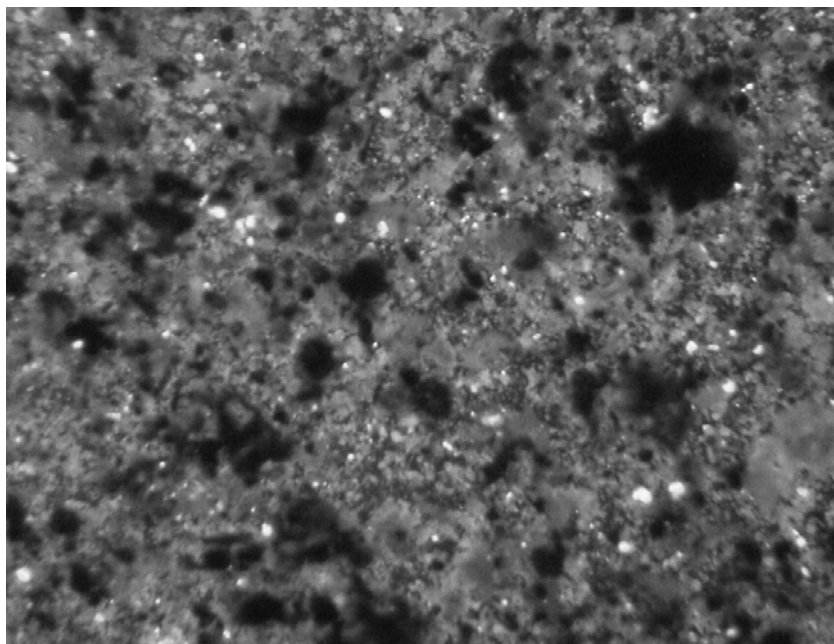


Рис. 2. Распределение частиц ВУТ и золы по размерам и плотности распределения

Стереомикроскопическое исследование продуктов сжигания ВУТ. Для исследования пыли, отобранной в вихревом пылеуловителе в ходе эксперимента по сжиганию ВУТ в вихревой адиабатической топке, проба была растворена в воде и разделена в ней на 2 фракции. Тяжелая фракция 80 – 85 % располагается на дне пробирного стакана, легкая всплывает на поверхность воды. Эти фракции пробы изучались раздельно, под стереомикроскопом при увеличении от 20 до 300 крат. Все частицы очень хорошо видны, они представляют собой частицы сферического типа, или, чаще, их обломки (рис. 3).



*Рис. 3. Стереомикроскопическое исследование пыли из циклона
(Отраженный свет. Увеличение 400х)*

Легкая часть состоит из частиц графита и прочих минеральных частиц. Частицы графита образуют либо целые герметически закрытые микросферолиты, либо сегментовидные обломки этих сферолитов. Графит перекристаллизован, однако кристаллы очень мелкие, кроме сферических и полусферических частиц наблюдается частицы графита линейно-вытянутые. Они представляют собой агрегат пластинчатых слюдоподобных кристаллов. Сферическая форма частиц создает впечатление об их значительном преобладании над другими частицами. Сферические частицы графита блестящие, черные имеют форму правильной сферы или удлиненного овалоида, размеры сфер различные от 2 – 3 микрометров до 100 микрометров.

Буровато-желтые частицы представлены силикатным стеклом, окрашенным оксидами железа. Крупные частицы это агломерат из стекловатых микросферолитов. Средние и мелкие изометричные частицы представляют собой более крупные микросферолиты, они очень редко бывают целыми, чаще представлены сегментовидными осколками. Содержание силикатного стекла в золе достигает 48 % в пыли циклона колеблется от 3,5 до 35 %. Кристаллический кремнезем представлен главным образом кристобалитом, реже α - и β -кварцем, их общее содержание колеблется от 0,5 до 8,5 %. Карбиды и нитриды кремния, алюминия и щелочноземельных металлов имеют зеленовато-серый цвет и составляют около 1 %. Особенно много в этой пыли пустотелых графитовых микросферолитов. По объему они составляют в разных пробах от 5 до 35 %, по массе от 2 до 18 %. Встречаются частицы изумрудно-зеленого цвета, причем в начале их не было видно, они появились с течением временем. Оказалось, что это железо-медный купорос (халькантит), поскольку в золе присутствует сульфиды кальция, железа и меди в достаточном количестве (около 2%).

Таким образом, проведенный гранулометрический анализ и стереомикроскопическое исследование, подтверждают, что при сгорании капель водоугольного топлива образуются полые сферические частицы более крупного размера, чем исходный ВУТ, что полностью соответствует предложенному выше механизму горения ВУТ.

Литература

1. Мочалов, С. П. Отходы углеобогащения – как сырьевая база для создания энергогенерирующих комплексов / С. П. Мочалов, А. А. Ивушкин, Л. П. Мышляев // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2011.

Информация об авторах:

Ермакова Людмила Александровна – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела информатизации образования СибГИУ; ermakova@sibsiu.ru; т.: 8(3843) 78-43-71

Ermakova Ludmila Aleksandrovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Education Informatization at Siberian State Industrial University

Мочалов Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор, ректор СибГИУ;
т.: 8(3843) 46-35-02, rector@sibsiu.ru.

Mochalov Sergey Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Rector of Siberian State Industrial University

Калашиников Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий в металлургии СибГИУ; kch@itm.sibsiu.ru; т.: 8(3843) 70-15-59.

Kalashnikov Sergey Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Informational Technologies in Metallurgy of Siberian State Industrial University

Пермяков Арнольд Аркадьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры геологии и геодезии СибГИУ; gig@sibsiu.ru; т.: 8(3843) 74-86-35.

Permyakov Arnold Arkadievich – Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Professor at the Department of Geology and Geodesics of Siberian State Industrial University

УДК 544.77.022.82:[546.74+546.56]

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ-МЕДЬ

В. М. Пугачев, В. Г. Додонов, О. В. Васильева, Ю. В. Карпушкина, Ю. А. Захаров

SYNTHESIS OF THE NANOCRYSTALLINE POWDER NICKEL-COPPER

V. M. Pugachev, V. G. Dodonov, O. V. Vasiljeva, Yu. V. Kharpushkina, Yu. A. Zaharov

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Исследования проводились в рамках проектов программ Президиума РАН и Минобрнауки РФ № 14.B37.21.0081.

Методами рентгеновской дифрактометрии и рентгеновского малоуглового рассеяния (МУР) исследованы процессы формирования нанокристаллических частиц в системе никель-медь. Рассмотрены состав и структура промежуточных продуктов и их влияние на состав наноразмерных частиц Ni-Cu. Измерены параметры решетки фаз от состава системы.

The processes of the formation of the nano-crystalline particles in the nickel-copper systems are investigated by the methods of X-ray diffractometry and small angle X-ray scattering. The composition and structure of intermediate products and the their influence on the composition of Ni-Cu nano-size particles are considered. The lattice parameters of phases depending on system composition are determined.

Ключевые слова: нанокристаллические порошки, твердый раствор, параметры решетки, кристаллическая структура, система никель-медь.

Keywords: nanocrystalline powder, solid solution, lattice parameters, crystalline structure, nickel-copper systems.

Введение

Настоящая работа является частью цикла по синтезу и исследованию свойств взаимных наноразмерных (НР) систем металлов железной группы, а также двухкомпонентных систем металлов этой группы с некоторыми другими переходными металлами (например [1 – 3]).

Изучение фазового состава промежуточных и конечных (целевых) продуктов синтеза таких систем необходимо для понимания механизмов формирования наноразмерного и наноструктурированного состояний многокомпонентных металлов и разработки методов получения материалов с заданными свойствами.

Ввиду широкого практического использования, в литературе подробно рассмотрены свойства массивных (макроразмерных) образцов Ni-Cu, хотя и здесь по ряду вопросов в литературе нет единого мнения. Последнее касается, например, фазовой диаграммы системы в области относительно низких температур (рис. 1), механизма окисления в разных условиях.

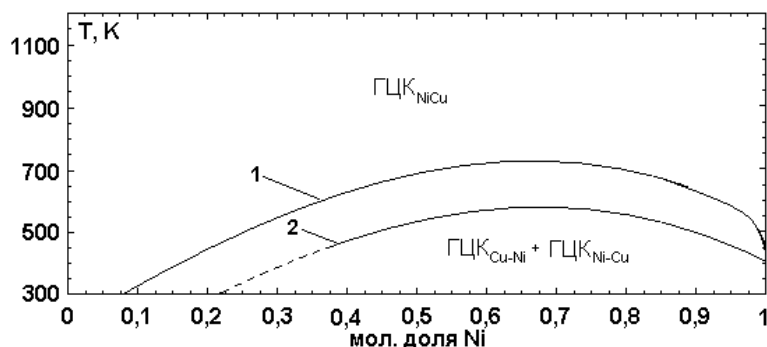


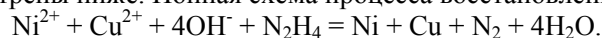
Рис. 1. Низкотемпературная часть фазовых диаграмм системы никель-медь, (1 – согласно [4], 2 – согласно [5])

Что касается наноразмерных порошков (НРП) Ni-Cu, следует отметить, что ни их свойства, ни закономерности и условия получения пока не изучены. Настоящая работа, по сути, является первой, посвященной этим вопросам.

Получение объектов исследования

НРП Ni-Cu получали в реакторе открытого типа объемом 100 – 200 см³ восстановлением смеси водных растворов хлоридов никеля и меди 20 – 25 кратным избытком гидразина (в форме гидразингидрата) в сильно щелочной среде (pH = 12 – 14) при 80 °С двумя способами: при одновременном добавлении к раствору солей щелочи и гидразина (способ А) и при последовательном добавлении сначала щелочи, а затем гидразина (способ Б). Указанные условия являются оптимальными [6] и позволяют получать рентгенографически чистые НРП Ni-Cu.

Одним из важнейших факторов, влияющих на очередность процесса восстановления Ni²⁺ и Cu²⁺, является существенное различие величин стандартных окислительно-восстановительных потенциалов (ОВП) для никеля и меди как в нейтральной (-0.257 В и +0.342 В соответственно), так и в щелочной (-0.72 В и -0.22 В) средах. Это приводит к тому, что процесс восстановления меди протекает быстрее. Последствия этого будут рассмотрены ниже. Ионная схема процесса восстановления:



Величина стандартного ОВП гидразина – 1.16 В, с переходом к щелочной среде, как следует из уравнения, ОВП становится еще отрицательнее, поэтому восстановление выгодно вести при высоких значениях pH. С другой стороны, при чрезмерно высокой щелочности катионы металлов в большей степени связываются в слабо растворимые гидроксидные фазы, что является фактором замедления реакции. Как показывает опыт, при этом уменьшается взаимная растворимость металлов, увеличиваются размеры частиц [6].

Реакцию восстановления проводили в течение 5 – 10 минут. Для охлаждения и понижения щелочности перед фильтрованием реакционную смесь заливали большим количеством холодной воды (не менее 1 дм³), затем осадок промывали ацетоном, снова фильтровали и высушивали в вакуумном шкафу. Получаемые образцы представляют собой черные или серовато-черные высокодисперсные порошки. Таким же образом – разбавлением холодной водой с теми же последующими процедурами – останавливали реакцию для изучения промежуточных продуктов.

В случае синтеза способом Б металлы, естественно, образуются за счет восстановления гидроксидов. Но и в режиме А – при одновременном добавлении щелочи и гидразина к раствору солей – в реакционной среде неизбежно образуются гидроксиды (что было показано экспериментально), и значительная часть металла образуется также через стадию восстановления гидроксидов. Таким образом, в приведенной выше реакции катионы металлов в основном поступают в реакционную среду за счет диссоциации промежуточных гидроксидных продуктов. При этом следует учитывать, особенно при высокой температуре синтеза, возможные превращения гидроксидов в оксиды. В свете сказанного представляется необходимым специальное изучение промежуточных гидроксидных и оксидных продуктов.

Методы исследования

Рентгенофазовый анализ (РФА), измерения параметров решетки нанокристаллических фаз и размеров кристаллитов методом [7] выполнены на дифрактометре ДРОН-3.0 в медном фильтрованном излучении.

Для разделения наложившихся рефлексов при анализе двухфазных систем применяли разрабатываемую методику моделирования дифракционных рефлексов, в основе которой лежит оригинальный способ получения инструментального профиля в любом заданном месте дифрактограммы, что позволяет эффективно использовать немонахроматизированное дублетное излучение. Вторая особенность методики заключается в использовании т.н. модифицированной функции Коши в качестве универсальной функции

уширения, для которой варьируется не только параметр ширины, но и параметр формы. Разделение рефлексов необходимо для адекватной оценки их положения и ширины, особенно в случае, когда один из рефлексов малоинтенсивен.

Исследование дисперсной структуры проводили методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУР) на малоугловом дифрактометре КРМ-1 в железном фильтрованном излучении.

Обработку всех дифракционных данных производили при помощи программ, разработанных в лаборатории РСА КемГУ.

Промежуточные продукты в ходе синтеза металлов

В работе исследовали как специально соосаждаемые гидроксиды никеля и меди, так и образующиеся в ходе синтеза (рис. 2).

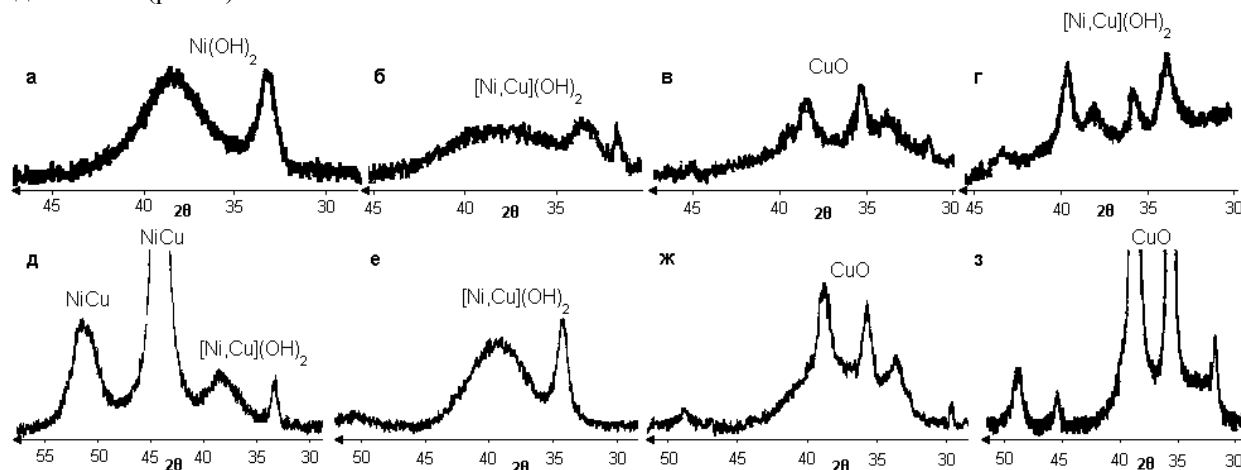


Рис. 2. Типичные рентгенограммы промежуточных продуктов восстановления при $\text{pH} \geq 12$ гидразин-гидратом смесей водных растворов хлоридов меди и никеля; а-г) соосажденные при $t = 25^\circ\text{C}$ смешанные гидроксиды, содержащие соответственно Cu 0 вес.%, 10 вес.%, 50 вес.% и 80 вес.%; д) продукты после восстановления в течение 2-х минут (Cu 20 вес.%); е-з) соосажденные при $t = 80^\circ\text{C}$ смешанные гидроксиды, содержащие соответственно Cu 20 вес.%, 40 вес.% и 80 вес.%

Гидроксиды никеля и меди относятся к различным структурным типам [8]. $\text{Ni}(\text{OH})_2$ имеет гексагональную структуру бруситового типа, как и многие другие гидроксиды двухвалентных металлов; $\text{Cu}(\text{OH})_2$ кристаллизуется в менее симметричной ромбической решетке. Параметры решеток соответственно: $a = 3.126 \text{ \AA}$, $c = 4.605 \text{ \AA}$ и $a = 2.94 \text{ \AA}$, $b = 10.59 \text{ \AA}$, $c = 5.256 \text{ \AA}$. Общим, однако, является то, что обе решетки представляют собой компактную упаковку из атомов кислорода, в октаэдрических пустотах которой расположены атомы металла. Поэтому можно ожидать ограниченной растворимости изучаемых гидроксидов друг в друге.

Опыты показали, что при содержании меди до $\approx 35\%$ (здесь и далее состав указан в массовых процентах и исключительно по металлу) образуется одна фаза с бруситовой структурой, но дифракционная картина по мере увеличения содержания меди постепенно становится все более и более рентгеноаморфной (рис. 2 а, б). Это можно объяснить тем, что растворимость твердых растворов (ТР) гидроксидов еще меньше, чем у гидроксида никеля, и уменьшается с увеличением содержания меди. При этом, естественно, образуются кристаллиты существенно меньших размеров (вплоть до 1 – 2 нм), что приводит к очень сильному уширению дифракционных линий. При непродолжительном (15 – 20 мин) нагревании в нейтральной или слабо щелочной средах (до pH около 9) происходит некоторое увеличение размеров кристаллитов за счет перекристаллизации (старения) и дифракционные максимумы становятся более выраженными.

Образцы с более высоким содержанием меди (35 – 50 %) также дают рентгеноаморфную дифракционную картину, однако являются неустойчивыми, и уже при обычной температуре (25°C) во влажном состоянии довольно быстро темнеют за счет образования в них оксида меди (II) (рис. 2 в). При еще большем содержании меди (50 – 65 %) начинает дифракционно проявляться решетка, свойственная гидроксиду меди. Образцы также темнеют при хранении во влажном состоянии из-за образования оксида меди. Вероятно, в этом интервале составов при быстром соосаждении образуются пересыщенные метастабильные гидроксиды, которые при влажном хранении перекристаллизуются в более устойчивые состояния, в том числе и в оксид меди (II).

В области составов более богатых медью (70 – 99 %) снова образуется вполне устойчивый, по-видимому, монофазный продукт – твердый раствор гидроксидов с ромбической структурой по типу гидроксида меди (рис. 2 г). Т. е. содержания никеля в 1 % уже достаточно, чтобы существенно снизить растворимость смешанного гидроксида и тем самым воспрепятствовать образованию CuO .

Для смешанных гидроксидов, полученных при 80°C, фазовая картина несколько иная. Рентгенографически монофазные продукты бруситового типа образуются при содержании меди лишь до $\approx 20\%$ (рис. 2 е-з). По-видимому, эта величина характеризует предельную растворимость одного гидроксида в другом в условиях «горячего» синтеза и при высокой щелочности ($\text{pH} = 12 - 14$), так как для составов, содержащих более 20% меди, рентгенографически отчетливо выявляется фаза CuO , образующаяся из избытка гидроксида меди, не вошедшего в бруситовую фазу.

Результаты рассмотрения надатомной структуры промежуточных продуктов методом МУР находятся в согласии с изложенными данными РФА и позволяют выделить по кривым рассеяния две фазы с существенно разной дисперсностью и морфологией (рис. 3). В образцах, содержащих до 20 вес.% меди, наблюдается лишь одна из них, более дисперсная, с выраженной двумерной морфологией (пластинки толщиной 2 – 3 нм) – соответствующая по этим параметрам фазе ТР. В составах с $\text{Cu} \geq 20$ вес.%, полученных при 80°C, наблюдаются две фазы, одна из которых сохраняет параметры ТР, а вторая, соотносимая с фазой CuO , представлена нитевидными образованиями или слабо разветвленными дендритами диаметром сечения ≈ 20 нм и длиной не менее 100 нм (вставка на рис. 3). Полученные из данных МУР области характерных размеров частиц ТР и CuO согласуются с оцененными согласно [7] по уширению дифракционных линий.

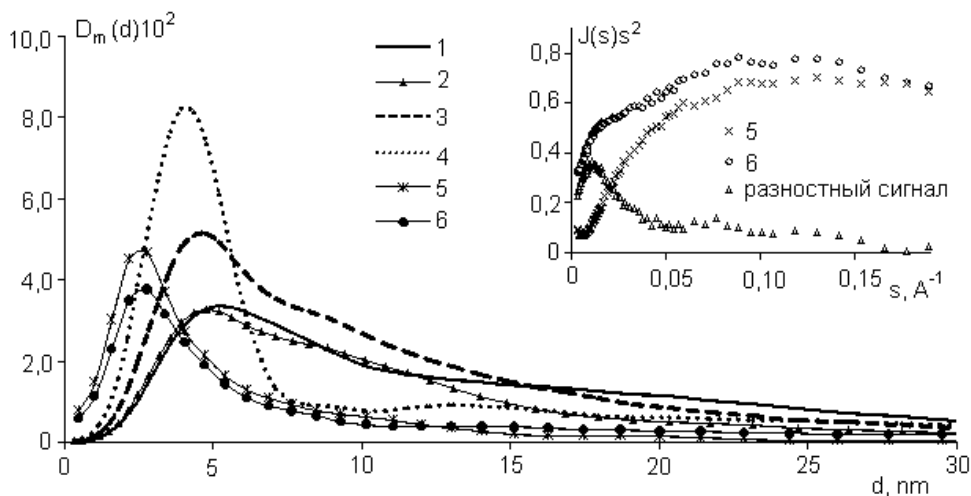


Рис. 3. Типичные кривые массового распределения частиц по размерам (результаты МУР) для $\text{Cu}(\text{OH})_2$ - 1; соосажденных при 25°C смешанных гидроксидов Cu и Ni , содержащих Cu 80 вес.%, 70 вес.% и 30 вес.% - соответственно 2, 3 и 4; соосажденных при 80°C смешанных гидроксидов, содержащих 20 вес.% и 40 вес.% Cu - соответственно 5 и 6. Вставка - разностная кривая МУР для составов смешанных гидроксидов, содержащих 20 вес.% (5) и 40 вес.% (6) Cu

Фазовый состав системы никель-медь

Судя по результатам рентгенографических исследований, НРП Ni-Cu в интервале составов от 5 до 95% меди представлены двумя твердыми растворами. Для всего спектра составов при помощи моделирования рентгеновских дифракционных рефлексов были выявлены рефлексы обоих твердых растворов (рис. 4) и по ним определены параметры решеток (рис. 5).

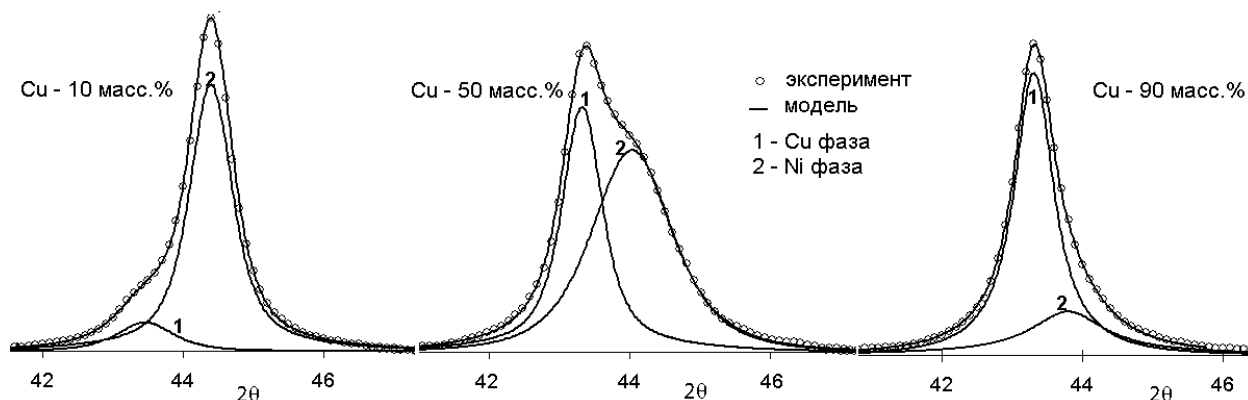


Рис. 4. Разложение дифракционного максимума 111 на фазовые составляющие методом моделирования

Основные особенности фазового портрета заключаются в том, что образующиеся твердые растры, являясь ограниченными, не ведут себя классически – не обнаруживают предельной растворимости компонентов друг в друге. В этом отношении ситуация напоминает наблюдаемую при сокристаллизации солей, когда концентрация входящего в твердую фазу компонента пропорциональна его концентрации в растворе. Другая наблюдаемая особенность – это более высокая растворимость меди в никеле (рис. 5) в противоположность тому, что следует из фазовых диаграмм (рис. 1). Обе эти особенности объясняются высокой скоростью и неравновесностью процесса, а также существенной разницей ОВП никеля и меди. В свете сказанного представляется логичным, что при синтезе в режиме «Б», в более равновесных условиях, проникновение меди в никель происходит в существенно меньшей степени, по крайней мере, для невысоких концентраций. Напротив, в режиме «А», когда скорость восстановления особенно высока, степень вхождения меди может практически соответствовать закону Вегарда (рис. 5 а).

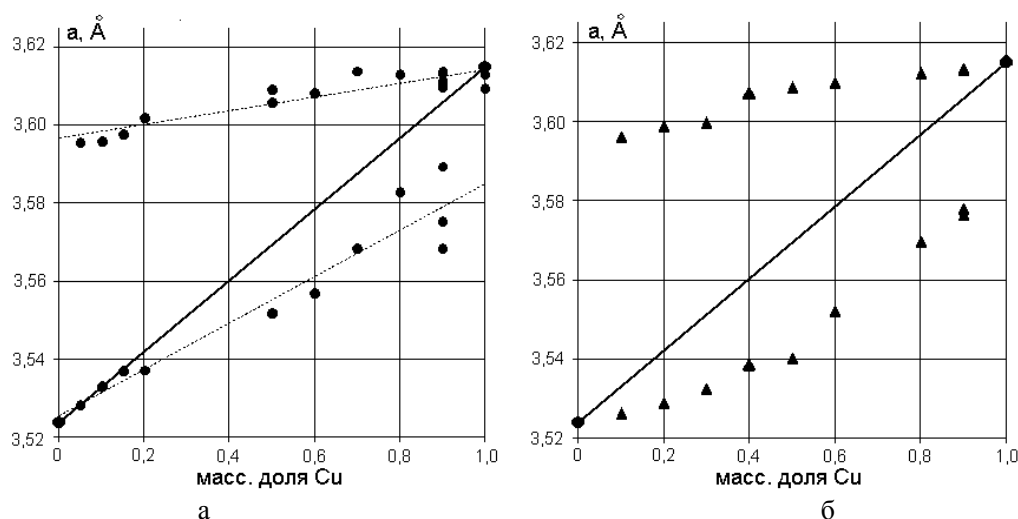


Рис. 5. Зависимость параметра решетки выделенных фаз от состава системы Ni-Cu; а – синтез в режиме «А», б – в режиме «Б».

Литература

1. Захаров, Ю. А. Синтез и свойства наноразмерных порошков металлов группы железа и их взаимных систем / Ю. А. Захаров, В. М. Пугачёв, А. Н. Попова [и др.] // Перспективные материалы. – 2008. – № 6 (1). – С. 249 – 254.
2. Захаров, Ю. А. Наноразмерные порошки системы железо-кобальт / Ю. А. Захаров, А. Н. Попова, В. М. Пугачёв, В. Г. Додонов // Свиридовские чтения: сборник статей. – Минск: БГУ, 2010. – Вып. 6. – С. 24 – 32.
3. Пугачёв, В. М. Фазовый состав и некоторые свойства наноразмерных порошков Ni-Co и Ni-Cu / В. М. Пугачёв, В. Г. Додонов, Ю. А. Захаров [и др.] // Перспективные материалы. – 2011. – № 11. – С. 156 – 163.
4. http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/fsstel/fsstel_figs.htm
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2. – 1024 с.
6. Захаров, Ю. А. Влияние условий синтеза на фазовый состав и дисперсную структуру нанокристаллических порошков медь-никель / Ю. А. Захаров, В. М. Пугачёв, В. Г. Додонов, О. В. Васильева // Развитие нанотехнологий: задачи международных научно-производственных центров: первая Междунар. конференция: сборник тезисов. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2012. – С. 81 – 83.
7. Ковба, Л. М. Рентгенофазовый анализ / Л. М. Ковба, В. К. Трунов. – М.: МГУ, 1976. – С. 148 – 155.
8. Чалый, В. П. Гидроокиси металлов / В. П. Чалый. – Киев: Наукова думка, 1972. – 158 с.

Информация об авторах:

Пугачев Валерий Михайлович - кандидат химических наук, доцент кафедры химии твердого тела, КемГУ, vm@kemsu.ru.

Pugachev Valerii Mikhailovich - Candidate of Chemistry, Associate Professor of the Department of Chemistry of Solids of Kemsu.

Додонов Вадим Георгиевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры химии твердого тела, КемГУ.

Dodonov Vadim Georgievich – Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research of the Department of Chemistry of Solids of KemSU.

Васильева Олеся Владимировна – аспирант кафедры химии твердого тела, КемГУ, olema2315@yandex.ru

Vasiljeva Olesya Vladimirovna – Post-graduate student of the Department of Chemistry of Solids of KemSU.

Карпушкина Юлия Васильевна – аспирант кафедры химии твердого тела, КемГУ.

Karpushkina Juliya Vasilyevna – Post-graduate student of the Department of Chemistry of Solids of KemSU.

Захаров Юрий Александрович – доктор химических наук, профессор, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой твердого тела КемГУ, zaharov@kemsu.ru

Zakharov Yuri Aleksandrovich – Doctor of Chemistry, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Chemistry of Solids of KemSU.

УДК 537.311.1:541.182.023.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ Fe-Co

В. М. Пугачев, А. Н. Попова, Е. Н. Зюзюкина, Ю. А. Захаров

STUDY OF PRODUCTS OF NANOSCALE SYSTEMS Fe-Co SYNTHESIS

V. M. Pugachev, A. N. Popova, E. N. Zyuzukina, Yu. A. Zakharov

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Исследования проводились в рамках проектов программ Президиума РАН и Минобрнауки РФ № 14.B37.21.0081.

Методами рентгеновской дифрактометрии исследованы фазовый состав и структурные особенности наноразмерных частиц систем Fe-Co, полученных жидкофазным восстановлением гидразингидратом водных растворов солей в щелочной среде. Исследованы процессы формирования наноразмерных твердых растворов металлов в системах железо-кобальт, их промежуточных – смешанных гидроксидов металлов и побочных продуктов – оксидно-гидроксидных фаз в наноразмерных системах железо-кобальт: определены фазовый состав и структурные параметры их.

The features of synthesis and the properties of Fe-Co system nanosize powders obtained by reduction of Fe and Co water solutions of salt at 80-90 °C (i.e. at the conditions close to normal) are investigated by the methods of wide-angle X-ray diffraction, element analysis, electronic microscopy. The macrostages of the synthesis in alkaline medium are established, the structural characteristics of the intermediate product are considered, the formula of the intermediate product compound is suggested. The features of the intermediate product are in authors opinion a condition of the formation of one of the final product of reducing – the solid solution of iron in nickel. The chemical compound of products is determined.

Ключевые слова: наноразмерные порошки, наноразмерные системы железо-кобальт, фазовый состав, смешанные гидроксиды металлов.

Keywords: nanopowders, system iron-cobalt, phase structure, mixed metal hydroxides (MMH).

Введение

На современном этапе развития техники требуется разработка и создание новых материалов на основе наноразмерных систем (НРС) ввиду ряда особенностей и уникальных свойств их по сравнению с «объемными» аналогами [1]. Так? на их основе получены разнообразные износостойкие покрытия, существенно продлевающие срок службы изделий, созданы сверхпрочные износостойкие ткани, наноэлектромагнитные сенсоры, способные регистрировать единичные молекулы отравляющих веществ, молекулярные фильтры, осуществляющие эффективную очистку и опреснение воды, эффективные катализаторы для нефтеперерабатывающей промышленности, негорючие нанокомпозиты на полимерной основе, нанодетекторы раковых клеток, лекарственные препараты и т. д; в частности, частицы НРС Fe-Co обладают высокими магнитными характеристиками, что обуславливает их использование в системах записи и хранения информации, для диагностики сварных соединений, для магнитного охлаждения, в

качестве магнитных сенсоров, в медицине, биологии и создании на их основе магнитных материалов [2, с. 249 – 254; 3, с. 79 – 83; 4, с. 24 – 32; 5, с. 699 – 704].

Целью выполняемой работы является углубленное изучение конечных, промежуточных и побочных продуктов синтеза наноразмерных систем Fe-Co.

Экспериментальная часть

1. Материалы и методика эксперимента

Для получения наноразмерных частиц (НРЧ) порошков Fe-Co был выбран метод химического восстановления водных растворов солей соответствующих металлов, т. к. он относится к прямым методам получения, а также ввиду возможности масштабирования его для получения больших количеств конечного продукта [3, с. 79 – 83]. НРС Fe-Co синтезировали в реакторе открытого типа по методике, описанной в работе авторов [4, с. 24 – 32]: в нагретый до необходимой температуры объем смеси водных растворов сульфата железа и хлорида кобальта последовательно при интенсивном перемешивании вводились гидроксид натрия (для получения промежуточных продуктов) и восстановитель (гидразингидрат). С целью получения оптимальных по свойствам НРЧ в ходе синтеза контролировались все параметры процесса (температура реакционной смеси, время синтеза, соотношение реагентов, pH среды). Химический состав НРС Fe-Co задавался определенным соотношением солей металлов – прекурсоров. Спустя 10 минут (достаточное время для формирования конечного продукта), реакция принудительно останавливалась – к реакционной смеси добавлялось большое количество дистиллированной воды. Методом декантации продукт отделялся от рабочего раствора. Влажный осадок несколько раз тщательно промывался водой, а также изопропиловым спиртом, затем сушился в вакуумном шкафу. Полученные образцы представляли собой мелкодисперсный порошок черного цвета.

Во время операций отмывки и фильтрования осадков в открытой атмосфере (на воздухе) может происходить частичное окисление металла с образованием побочных продуктов – оксидно-гидроксидных фаз (ОГФ) переменного состава $[\text{Fe}, \text{Co}](\text{OH})_2 \cdot \text{FeOON}$ и шпинельных фаз (ШФ) [2, с. 249 – 254].

Для исследования промежуточных продуктов – неокисленных смешанных гидроксидов металлов (СГМ) состава $[\text{Fe}, \text{Co}](\text{OH})_2$ синтез проводили в инертной атмосфере в боксе при постоянной температуре, варьировали соотношения концентраций реагентов (от 0 до 100 масс.% по содержанию железа) и время протекания реакции. Для предотвращения трансформации СГМ в ОГФ при работе с гидроксидами на открытом воздухе образцы промежуточных продуктов в боксе защищались тонким слоем глицерина.

Для исследования структурных параметров побочных продуктов образцы ОГФ системы Fe-Co получали из СГМ, синтезированных и высушенных на открытом воздухе.

2. Методы исследования НРС

Все полученные образцы порошков НРС Fe-Co, а также СГМ и ОГФ исследовались методами рентгенофазового (РФА) и рентгеноструктурного (РСА) анализа: проводились измерения параметров решетки нанокристаллических фаз и размеров кристаллитов по методике [6, с. 148 – 155]. Рентгенограммы регистрировали на порошковом дифрактометре ДРОН -3.0 в железном излучении.

Формо-размерные характеристики образцов оценивались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6390, на рентгенофлуоресцентной установке к которому исследовался химический состав локальным элементным анализом (РФЛА).

Результаты и обсуждение

Основные продукты синтеза НРС Fe-Co

1. Фазовый состав НРС Fe-Co

Методами РСА и РФА установлено, что в широкой области составов образуются твердые растворы металлов (ТРМ) с решетками (структурами) металлических компонент: объемцентрированная кубическая (ОЦК), характерная для железа, а также гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ), характерные для кобальта. Однако формирование наноразмерных ТРМ при восстановительном синтезе не вполне подчиняется известным диаграммам фазовых равновесий. Главная особенность заключается в том, что в наноразмерном состоянии в условиях относительно невысоких температур синтеза реализуются преимущественно «высокотемпературные» фазы и соответствующим образом смещаются границы взаимной растворимости компонентов (см. рис. 1: выделенная полоса).

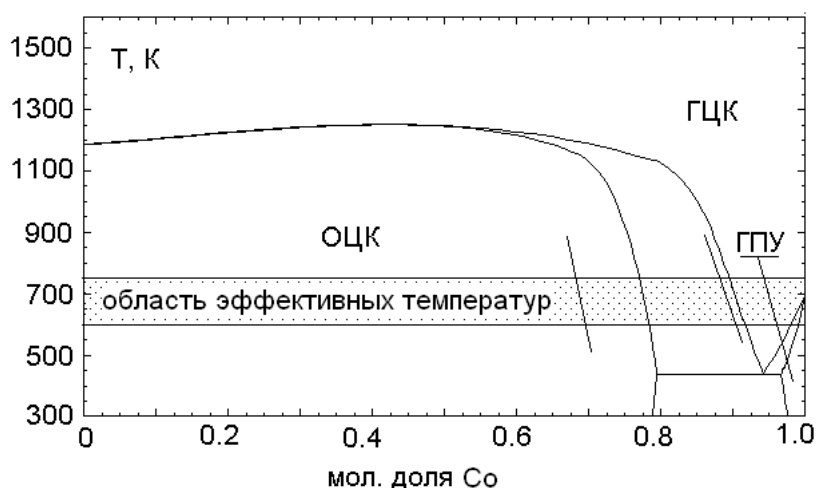


Рис. 1. Фазовые портреты НРС Fe-Co

Так, в наноразмерной системе железо-кобальт практически не реализуется двухфазная область сосуществования ТРМ с ГПУ и ОЦК решетками. А «чистый» (индивидуальный) кобальт получается в двухфазном состоянии (смесь ГПУ и ГЦК), причем изменяя условия синтеза, можно варьировать соотношение фаз. В частности, при увеличении концентрации солей, а в еще большей степени – при увеличении концентрации восстановителя, удастся довести долю «высокотемпературной» ГЦК фазы до 90%.

Изменение параметров решетки ГЦК фазы, согласно закону Вегарда, в системе Fe-Co наблюдается практически от нулевой концентрации в ней железа. При этом количество сосуществующей с ней ГПУ фазы быстро уменьшается, и в системах с 2 % железа она практически исчезает.

В составах, начиная от 10 % железа, появляется заметное количество ОЦК фазы, и с увеличением содержания железа ее количество растет, а доля ГЦК фазы быстро падает. Однако в интервале 10 – 20 % железа поведение системы не классическое. Вместо смеси насыщенных ТРМ образуются растворы с переменными параметрами и содержанием второго компонента, превышающем предельное, определяемое диаграммой состояния. Подобное превышение пределов растворимости является следствием образования пересыщенных растворов. Причина образования таких растворов, очевидно, объясняется высокой скоростью и неравновесностью процесса восстановления, возможно также определенную роль играет и влияние наноразмерного состояния.

2. Морфология и формо-размерные характеристики НРС Fe-Co

Согласно электронной микроскопии порошки Fe-Co, составлены из сфероподобных частиц субмикронных размеров, агломерированных в рыхлые образования. Вероятно, склонность наночастиц к агломерированию обусловлена тем, что НРЧ обладают большой развитой поверхностью по отношению к объему частицы, это приводит к стремлению их сократить суммарную поверхностную энергию в целом. Ввиду высокой склонности к агломерации определить распределение по размерам частиц затруднительно.

Морфология частиц НРС характеризуется многоуровневой иерархией: наноразмерные кристаллиты формируют сферические агломераты устойчивые к ультразвуковой дезагрегации. Было отмечено, что в НРС Fe-Co при увеличении содержания кобальта в системе средний размер частиц увеличивается, а форма агломератов становится дендритоподобной, при этом они также составлены из нанокристаллитов.

Промежуточные продукты синтеза НРС Fe-Co

Авторами ранее было установлено [2, с. 249 – 254], что процесс получения НРС Fe-Co в выбранных оптимальных условиях протекает через стадию формирования промежуточных продуктов – с высокой скоростью образуются смешанные гидроксиды металлов (СГМ) системы Fe-Co. В последующей стадии получения конечного продукта: катионы металлов, находящиеся в растворе в результате диссоциации СГМ, восстанавливаются с образованием твердых растворов Fe-Co.

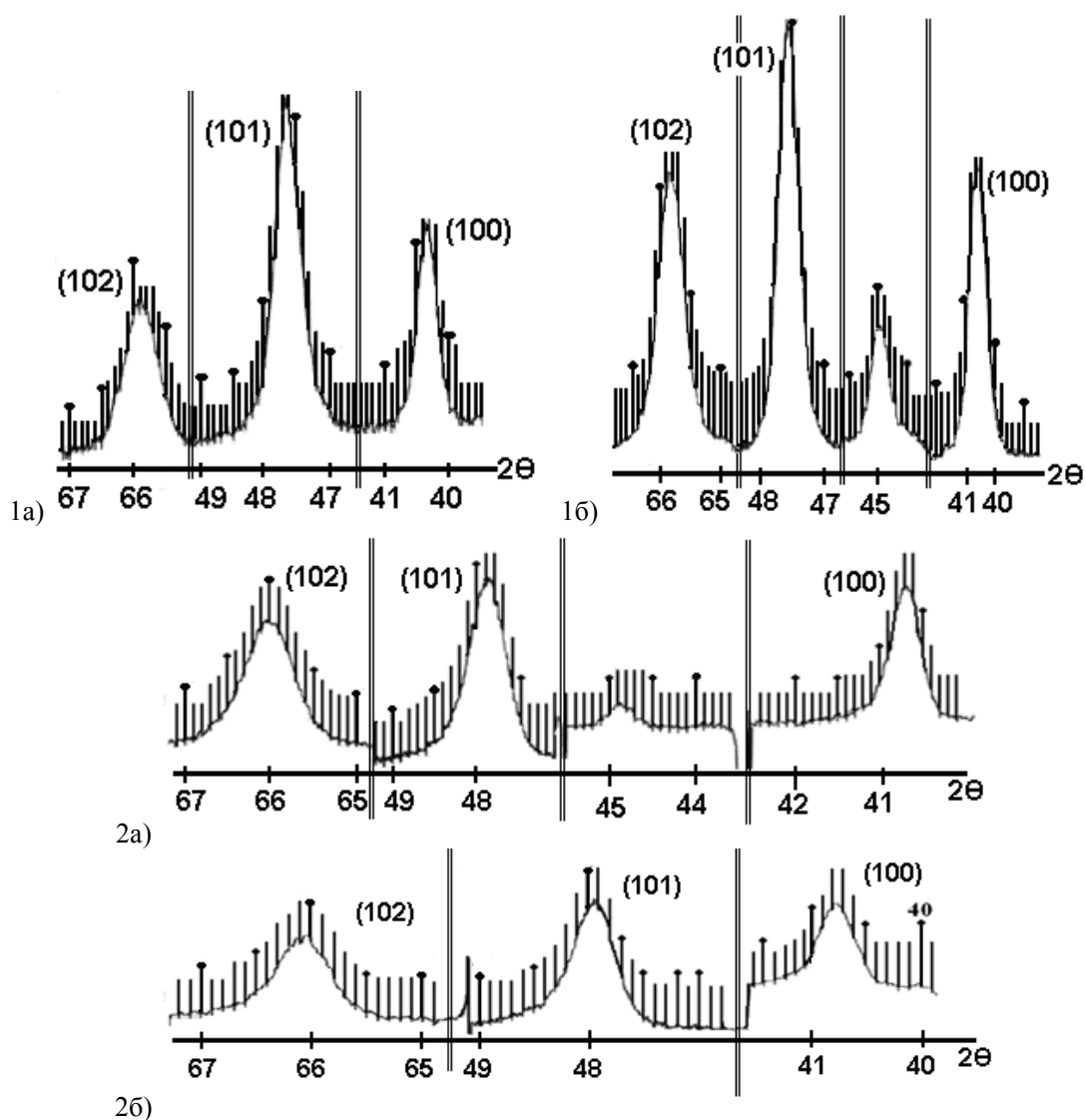


Рис.2 Рентгенограммы СГМ с 10-секундным (а) и 10 минутным (б) временем протекания реакции для систем Fe-Co (20% Co -1 и 50% Co-2)

С целью получения неокисленных промежуточных продуктов синтез их проводили в атмосфере инертного газа. Для предотвращения последующего окисления при выделении, СГМ защищали слоем глицерина. Методом рентгеновской дифракции образцов смешанных гидроксидов металлов было показано, что присущие им рефлексы во всем концентрационном диапазоне проявляются на соответствующих углах 40,6; 47,8 и 66,1 град (рис. 2).

Факт симметричности рефлексов косвенно свидетельствует о монофазности СГМ во всем рассматриваемом диапазоне: это наблюдается как при 10 секундном, так и при 10 минутном времени протекания реакции.

Были рассчитаны параметры решетки СГМ, на рис. 3 приведена зависимость объема элементарной ячейки СГМ от их состава.

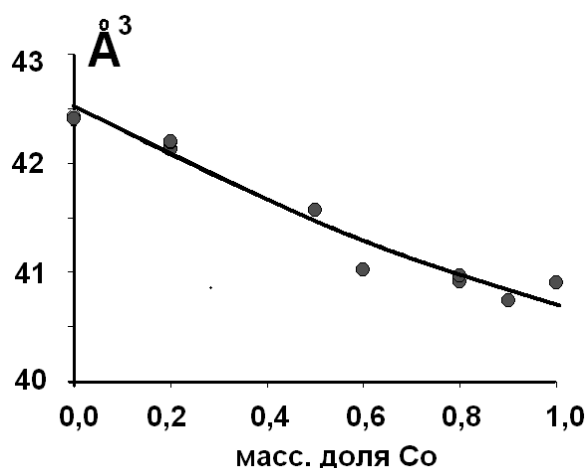


Рис. 3. Зависимость объема элементарной ячейки СГМ от состава системы

Как видно, наблюдается близкая к линейной зависимость объема элементарной ячейки СГМ от состава, т. е. выполняется правило Вегарда.

Полностью избежать окисления СГМ, видимо, не удалось: кислород проникает через защитную пленку глицерина, об этом говорит небольшой разброс данных (рис. 3). В результате окисления двухвалентное железо частично переходит в трехвалентное состояние с меньшим размером, что приводит к уменьшению параметров решетки.

При хранении величина параметров СГМ уменьшается, что и ожидалось, т.к. происходит постепенный процесс окисления железа, т. е. трансформация СГМ в ОГФ ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$) (рис. 4).

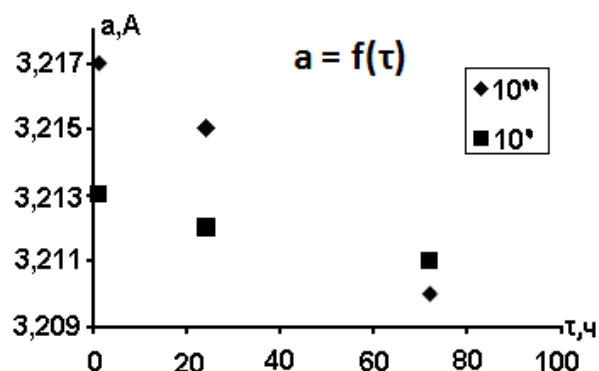


Рис. 4. Зависимость параметра «а» решетки СГМ от времени хранения при содержании Со – 50 %

Результаты исследования процесса окисления гидроксидов при хранении показали следующее: на рентгенограммах сразу после синтеза регистрируются рефлексы смешанных гидроксидов и в незначительном количестве присутствуют рефлексы шпинельной фазы (рис. 5). Интенсивность линии ШФ увеличивается с увеличением содержания закладываемого при синтезе железа в системе Fe-Co. Через несколько часов рефлексы гидроксидов и ШФ сохраняются, но дополнительно фиксируются рефлексы ОГФ. Спустя несколько дней, рефлексы гидроксидов не наблюдаются, регистрируются только рефлексы ОГФ и ШФ.

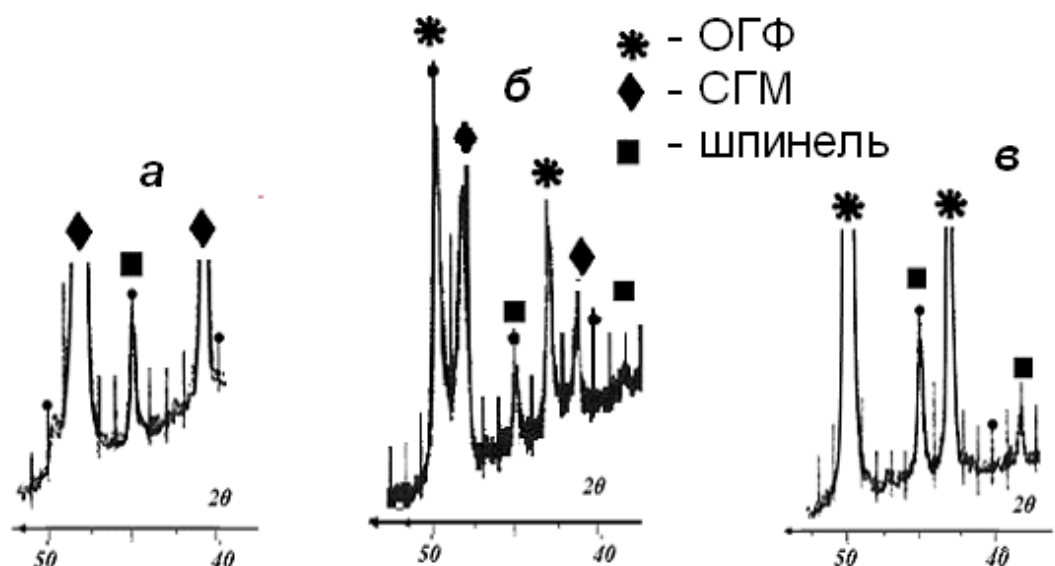


Рис. 5. Окисление СГМ при хранении: под глицерином сразу после синтеза (а) и спустя 3 ч. (б), и без глицерина после контакта с воздухом

Побочные продукты синтеза НРС Fe-Co

Как уже было отмечено, в ходе синтеза образуются и побочные продукты – оксидно-гидроксидные фазы (ОГФ) и шпинельные (ШФ). Рентгенограммы синтезированных ОГФ отличаются от рентгенограмм соответствующих СГМ с бруситовой структурой только тем, что дифракционные линии смещены в большие углы. Соответственно параметры решетки ОГФ монотонно уменьшаются с увеличением содержания железа от значений, соответствующих параметрам решетки гидроксида кобальта рис.6.

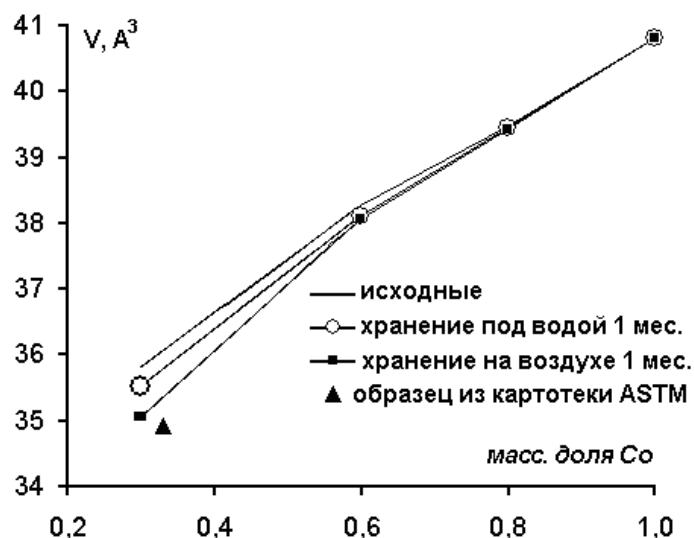


Рис.6. Изменение объема ячейки ОГФ системы Fe-Co при хранении

При получении и выделении ОГФ обычным порядком [2, с. 249 – 254; 3, с. 79 – 83; 4, с. 24 – 32], по-видимому, окисляется не сразу все железо. Как показывают эксперименты, при хранении продолжается некоторое уменьшение параметров решетки, особенно заметное в образцах с большим количеством железа. Причем при хранении под водой этот процесс происходит медленнее.

Следует сказать, что выдерживание образцов под водой в течение месяца приводит к окислению ОГФ в меньшей степени, чем при их хранении на воздухе.

Литература

1. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва: Химия, 2000. – 672 с.

2. Синтез и свойства наноразмерных порошков металлов группы железа и их взаимных систем / Ю. А. Захаров [и др.] // Перспективные материалы. – 2008. – № 6 (1).
3. Некоторые свойства наноразмерных порошков систем железо-кобальт и железо-никель / Ю. А. Захаров, В. М. Пугачёв, В. Г. Додонов, А. Н. Попова // Ползуновский вестник. – 2008. – № 3.
4. Наноразмерные порошки системы железо-кобальт / Ю. А. Захаров, А. Н. Попова, В. М. Пугачёв, В. Г. Додонов // Свиридовские чтения: сборник статей. – Минск: БГУ, 2010. – Вып. 6.
5. Плотность наноразмерных порошков систем железо-кобальт и железо-никель / Ю. А. Захаров, А. Н. Попова, В. М. Пугачёв, В. Г. Додонов // Перспективные материалы. – 2011. – № 13 (2).
6. Ковба, Л. М. Рентгенофазовый анализ / Л. М. Ковба, В. К. Трунов. – М.: МГУ, 1976.

Информация об авторах

Пугачёв Валерий Михайлович – кандидат химических наук, доцент кафедры химии твердого дела, КемГУ, т. 8(3842) 580591, zaharov@kemsu.ru

Pugachev Valeriy Michaylovich – Candidate of Chemistry, Associate Professor of the Department of Solid State Chemistry at the Faculty of Chemistry of KemSU.

Попова Анна Николаевна – кандидат химических наук, ведущий инженер кафедры химии твердого дела КемГУ, т. 8 (3842) 580591, zaharov@kemsu.ru

Porova Anna Nickolaevna – Candidate of Chemistry, Engineer of the Department of Solid State Chemistry at the Faculty of Chemistry of KemSU.

Зюзюкина Елена Николаевна – аспирант, учебный мастер кафедры химии твердого дела, КемГУ, т. (3842) 580591, zaharov@kemsu.ru

Zyuzukina Elena Nickolaevna – post-graduate student, the master of the Department of Solid State Chemistry at the Faculty of Chemistry of KemSU.

Захаров Юрий Александрович – член-корр. РАН, доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой химии твердого дела, КемГУ, тел.: 8(3842) 580591, zaharov@kemsu.ru

Zaharov Yuriy Aleksandrovich – corresponding member of RAS, Doctor of Chemistry, Professor, Honored worker of science of the Russian Federation, Head of the Department of Solid State Chemistry of KemSU.

УДК 550:42

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНОК ИОННОГО СОСТАВА ТЕХНОПРИРОДНЫХ ВОД КУЗБАССА

Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, А. А. Воротилов

PROSPECTS OF APPLICATION HYDROCHEMICAL SOFTWARE COMPLEX FOR EVALUATION OF IONIC COMPOUND OF KUZBASS NATURAL WATERS

E. L. Schastlivtsev, S. G. Pushkin, A. A. Vorotilov

Приводятся: результаты поэтапной обработки с использованием программного комплекса, экспериментальных данных анализов гидролого-гидрохимических параметров техноприродных вод Кузбасса; описания получаемых многоингредиентных модельных гидрохимических объектов; модельные гидрохимические показатели различных типов вод.

The paper presents: the results of stepwise processing of the experimental data of Kuzbass natural and technogenic waters hydrological and hydrochemical parameters analyses, using the software; the description of the received multi-component model hydrochemical objects; model hydrochemical characteristics of different types of waters.

Ключевые слова: модельные расчеты, гидрологические и гидрохимические показатели, анионы, катионы.

Keywords: model calculations, hydrological and hydrochemical parameters, anions, cations.

С целью автоматизации процесса обработки больших объемов гидролого-гидрохимической информации о техноприродных водах Кузбасса и получения их обобщенных характеристик, в среде Matlab создается пакет программ, позволяющий вычислять мониторинговые показатели вод различного происхождения (дождевых, речных, подземных, стоковых и т. д.), которые в последующем используются при идентификации источников загрязнения и оценках их вкладов [1, с. 163 – 169; 4].

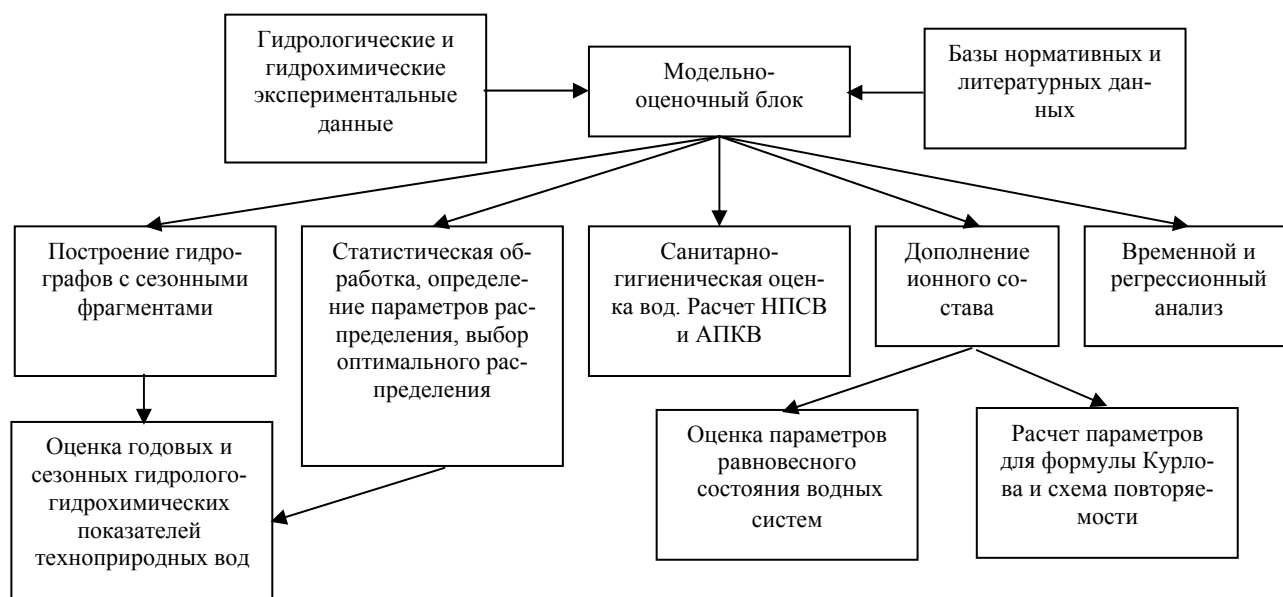


Рис. 1. Общая схема программного комплекса

В гидрологической части программы предусмотрена обработка годовых массивов данных по расходам рек с целью построения гидрографов, выделения гидрологических сезонов (зимняя межень, половодье, летне-осенняя межень, дождевые паводки) и определения для них статистических показателей (таблица 1). Эти данные, наряду с химическим составом проб, использовались для выявления сезонных и межсезонных закономерностей формирования различных типов вод.

Таблица 1

Статистические показатели сезонных расходов воды р. Средняя Терсь за 1993 г. (м³/с)

	N	Среднее	Ст. откл	Минимум	Максимум
Зим. меж	92	12,9	1,7	10,7	19,2
Половодье	106	180,0	132,3	21,1	538,0
Лет. меж	46	27,9	9,7	18,9	63,3
Дожд. пав	70	78,3	48,7	23,0	216,0
Ос-зим. м.	51	15,0	2,0	12,5	20,3

В работе использованы данные ряда организаций, осуществляющих мониторинг на территории Кемеровской области [3, с. 566 – 569; 5], полученные с использованием различных методик, содержащие различное количество определяемых ингредиентов, и зачастую характеризованные по неполному составу ионов. Так, например, в водах р. Ускат и Средняя Терсь определяются ионы NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ и, как правило, не определяется ион натрия. Поэтому на начальном этапе автоматизации выполнялись вычислительные процедуры по восстановлению данных для основных ионов: натрия, кальция, магния, сульфатов, гидрокарбонатов и хлоридов, а характеристики остальных ионов используются в расчетах показателей недостающих ионов из основной группы и в последующих модельных расчетах.

Для сравнения использовались базы данных, созданные на основе, как правило, осредненных показателей, приводимых различными авторами, напр. [6 – 7].

Для каждого из ингредиентов определялся вид распределения (рассматривались нормальное, логнормальное и вейбула), наиболее пригодный (оптимальный) для описания массива данных, и рассчитывались

статистические показатели для двух наиболее часто используемых распределений нормального и логнормального (рис. 2 и табл. 2). В качестве критерия оптимальности использовалась сумма квадратов отклонений (СКО) от экспериментальных данных.

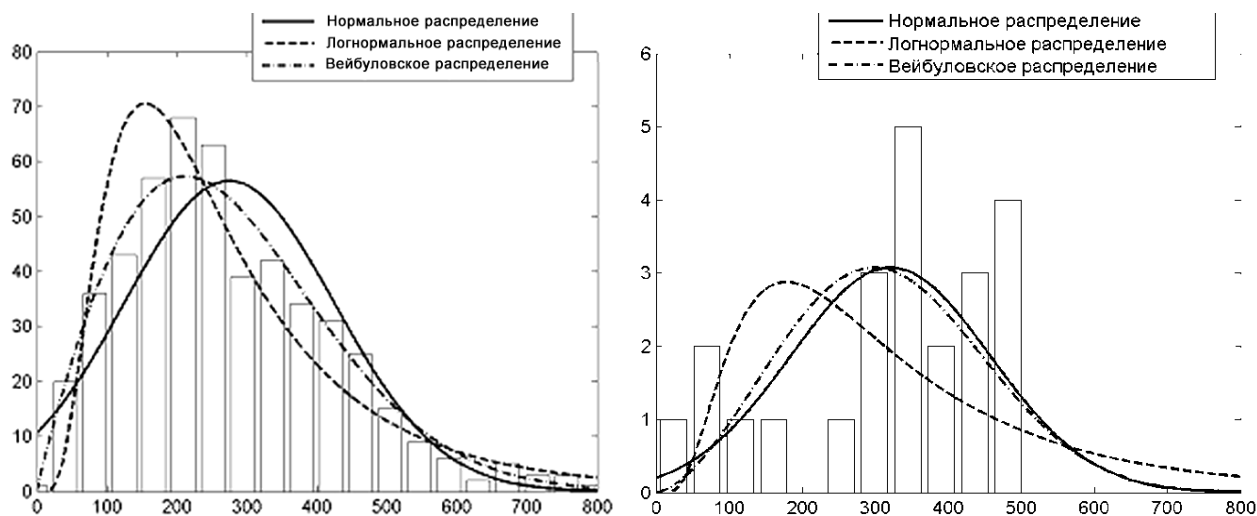


Рис. 2. Распределение содержаний гидрокарбонатов в подземных водах (а) и в р. Ускат (б)

Таблица 2

Статистические параметры содержания ионов в подземных водах и стоках

	Подземные воды		Ускат		ш. Егозозская		р. Камышанский	
	CA	HCO ₃	CA	HCO ₃	CL	SO ₄	CL	SO ₄
N	504	504	23	23	20	20	28	27
ср. арифметическое	42,3	274,7	51,1	358,8	82,5	144,8	98,6	4,6
ст. отклонение	32,1	150,0	30,8	98,1	15,3	44,2	24,5	2,7
ср. геометрическое	31,0	231,4	39,3	338,2	80,9	138,3	96,0	4,2
лев. гр. ДИ	13,3	122,6	16,9	224,0	65,4	101,0	76,1	2,8
прав. гр. ДИ	72,5	436,7	91,6	510,8	100,0	189,4	121,1	6,4
мин. выб	1,8	14,0	6,3	67,3	42,4	82,0	34,0	1,9
макс. выб	286,6	856,4	122,7	504,6	105,0	246,0	160,5	16,2
Опт. распр	вейб	вейб	логн	норм	логн	норм	вейб	вейб
СКО	0,4	0,02	0,06	0,02	0,82	0,1	0,07	0,07

Табличные данные свидетельствуют, что для гидрокарбонатов подземных вод оптимальным является распределение Вейбула, а для вод р. Ускат нормальное.

В табл. 3 приведены параметры многоингредиентных модельных гидрохимических объектов (МИМГХО), сформированные путем усреднения 12 проб, одновременно отобранных в районе дислокации р. Бунгурский (расположенного в 16 километрах юго-западнее г. Новокузнецка).

МИМГХО характеризуются: областью определения данных ингредиентов, представленную данными гр. 2-3; средним арифметическим (гр. 4), являющимся аналогом кларковых содержаний; средним геометрическим (гр. 5); параметрами логнормального распределения гр. 6 – 7. В диапазоне от левой границы доверительного интервала (ДИ лг) до его правой границы (ДИ пр) содержится около 70 % экспериментальных данных каждого из ингредиентов. Из соответствующих параметров НПСВ аналогично формируются относительные ММГХО.

Один из блоков программы позволяет вычислять корреляционные зависимости, между измеряемыми ингредиентами и расходами воды в реке. Корреляции гидрокарбонатов с расходом воды представлены для р. Средняя Терсь рис. 4.

Таблица 3

Параметры многоингредиентных модельных гидрохимических объектов (мг/л)

	Минимум	Максимум	Среднее	Сред. геом.	ДИ лг	ДИ пг
1	2	3	4	5	6	7
Аммоний	0,12	1,77	0,61	0,39	0,15	1,02
Нитрат	0,57	56,48	12,28	2,79	0,48	16,22
Нитрит	0,2	1,7	0,54	0,39	0,18	0,85
Гидрокарбонаты	180	558,3	303,1	289,6	212,5	394,7
Калий	0,85	2,79	1,51	1,42	0,99	2,04
Кальций	55,79	197,5	93,00	87,58	62,14	123,42
Магний	11,19	93,39	27,96	22,81	12,31	42,27
Натрий	7,58	17,39	11,51	10,95	7,86	15,26
Сульфаты	8,12	329,7	71,32	42,9	15,6	117,99
Хлориды	3,58	10,59	7,86	7,57	5,56	10,31
Сухой остаток	201	1076	383,8	340,1	212,5	544,4

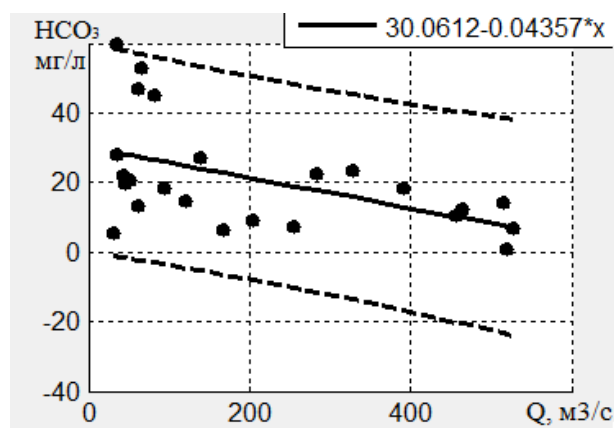
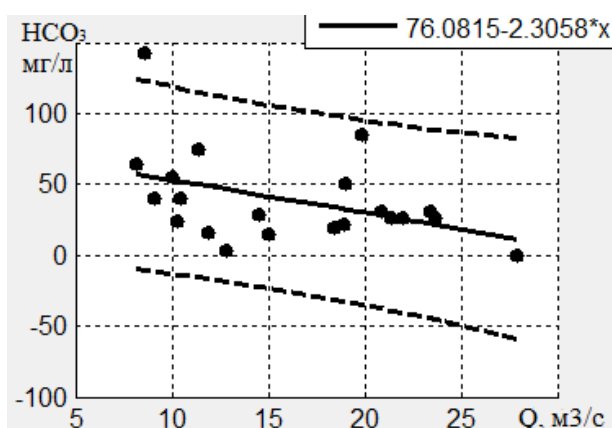


Рис. 3. Зависимость концентрации гидрокарбонатов от расходов воды в р. Средняя Терсь в межень и половодье 1989 – 1999 гг.

Данные рис. 3 и табл. 4 свидетельствуют о том, что реализуются различные тенденции поведения ингредиентов в зависимости от расхода воды, как возрастающие, так и убывающие.

Судя по уравнениям регрессии скорость убывания содержаний гидрокарбонатов в зависимости от расхода воды в межень, по сравнению с половодьем, значительно больше (в 33 раза для р. Средняя Терсь, в 19 раз для р. Ускат). Аналогичные тенденции реализуются для сульфатов и минерализации (Ср. Терсь, Ускат) и нитрита (Ускат). В водах р. Ускат для шести ингредиентов (аммоний, нитрат, магний, фосфат, хлорид, водород) в меженные и паводковые периоды реализуются противоположные зависимости их концентраций от расхода, убывающие и возрастающие соответственно. Для магния (р. Ср. Терсь), в противоположность этому, в меженный период проявляется возрастающая зависимость, а в половодье – убывающая. Концентрация кальция (р. Ср. Терсь) в меженный период убывает в 50 раз быстрее, чем в половодье, а в р. Ускат растет в 220 раз быстрее, чем в половодье. Это, по-видимому, свидетельствует о различиях процесса формирования содержаний ионов в различные гидрологические сезоны.

Таблица 4

Параметры регрессионных зависимостей ионов от расходов речных вод

	Ускат				Средняя Терсь			
	Половодье		Межень		Половодье		Межень	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Аммоний	0,003	0,97	-0,77	2,39	0,0001	0,12	0,003	0,06
Нитрат	0,003	0,83	-0,16	1,4	3E-04	0,08	0,02	0,08
Нитрит	-0,0006	0,06	-0,004	0,04	4E-06	0,003	0,002	0,02
Сульфат	-0,2	67,7	-15,3	113	-0,0002	5,5	-0,03	5,7
Гидрокарбонат	-3,4	246	-66	471	-0,07	44,2	-2,3	76
Кальций	0,05	30	11,3	32	-0,01	11,3	-0,5	18,5
Магний	0,03	14	-7,2	44,6	-0,02	11	0,03	4,7
Кислотность (pH)	0,001	8	-0,07	8	-6E-05	7	-0,1	8,8
Минерализация	-4,8	444	-106	823	-0,1	76	-3	116
Фосфат	0,001	0,05	-0,15	0,4	3E-05	0,003	6E-06	0,01
Хлорид	0,001	10,9	-8	36,4	5E-04	1,13	0,05	0,7

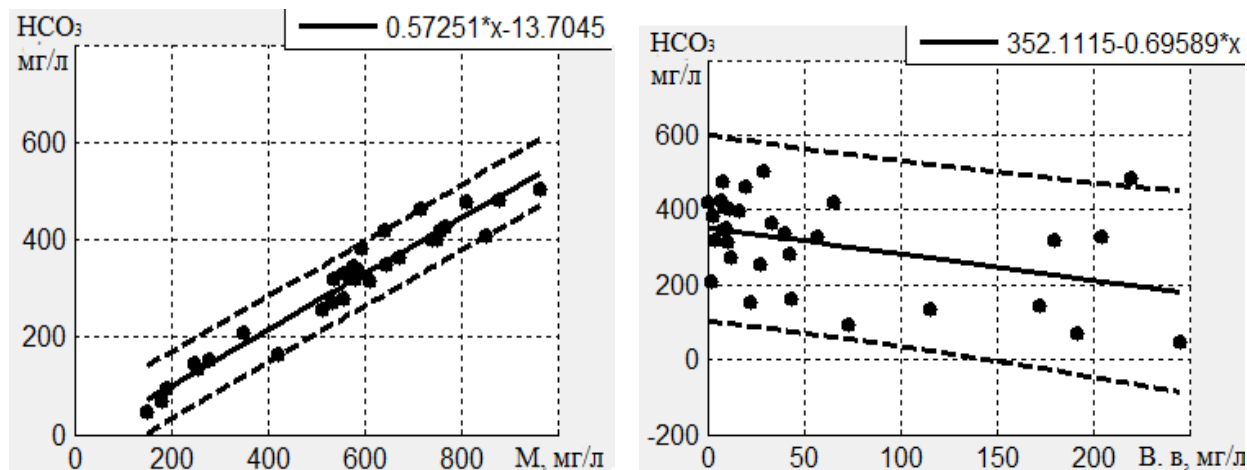


Рис. 4. Зависимость концентрации гидрокарбонатов от минерализации и взвешенных веществ в р. Ускат 1996 – 2000 гг.

Таблица 5

Многолетние НПСВ речных вод

	ПДК	Средняя Терсь		Ускат		Аба	
		средние	ГПСВ	средние	НПСВ	средние	НПСВ
Аммоний	0,5	0,15	0,31	1,39	2,78	1,99	3,98
Нитрат	40	1,31	0,03	4,9	0,12	10Ю34	0,26
Нитрит	0,08	0,03	0,41	0,13	1,64	0,27	3,4
Гидрокарботанты	240	33,72	0,14	309,72	1,29	302	1,26
Кальций	180	9,45	0,05	46,04	0,26	37,38	0,21
Магний	40	6,62	0,17	27,87	0,7	27,43	0,69
Сульфаты	100	5,39	0,05	80,97	0,81	76,69	0,77
Фосфаты	0,25	0,01	0,04	0,14	0,58	0,08	0,33
Хлориды	300	1,35	0,005	19,9	0,07	30,92	0,1
Натрий	120	1,91	0,02	68,1	0,57	48,9	0,41

Воды схожего происхождения часто имеют характерные особенности состава, к примеру, в шахтных водах наблюдаются высокие значения концентрации взвешенных веществ, минерализации. Зависимости концентраций ионов от взвешенных веществ и минерализации и ионов водорода (pH) позволяют выявить общие закономерности происхождения, для тех или иных ассоциаций. Так для гидрокарбонатов (р. Ускат,

рис. 4) реализуются следующие тенденции: их рост в зависимости от минерализации и убывание в зависимости от взвешенных веществ.

При санитарно-гигиенической оценке вод нами используются нормализованные показатели, характеризующие долевой состав воды, по отношению в основном к предельно допустимым концентрациям ингредиентов [8], а также ассоциативные показатели, демонстрирующие коллективную загрязненность вод той или иной группой ингредиентов [1 – 3], табл. 5.

Данные таблицы 5 свидетельствуют о том, что воды Средней Терси по санитарно-гигиеническим показателям являются достаточно чистыми ($НПСВ_i < 1$). Воды р. Ускат и р. Аба загрязнены аммонийным и нитритным азотом, а также гидрокарбонатами ($НПСВ_i > 1$), ассоциативные показатели для них равны 1.98 и 2.88 соответственно.

Оценки перенасыщенности вод $CaCO_3$ осуществлялись с использованием системы уравнений:

$$\begin{aligned} [H_2CO_3] * f_{H_2CO_3} &= P_{CO_2}(T, P) * K_{CO_2} \\ [H^+] f_{H^+} * [HCO_3^-] * f_{HCO_3^-} &= K_1 * [H_2CO_3] * f_{H_2CO_3} \\ [H^+] f_{H^+} * [CO_3^{2-}] * f_{CO_3^{2-}} &= K_2 * [HCO_3^-] * f_{HCO_3^-} \\ [Ca^{2+}] * f_{Ca^{2+}} * [CO_3^{2-}] * f_{CO_3^{2-}} &= L \\ 2 * [Ca^{2+}] + [H^+] - 2 * [CO_3^{2-}] - [HCO_3^-] &= \Sigma_{ан} - \Sigma_{кат} \end{aligned}$$

где $[H_2CO_3]$, $[Ca^{2+}]$, $[HCO_3^-]$, $[CO_3^{2-}]$, $[H^+]$ – концентрации углекислоты, ионов кальция, гидрокарбонатов, карбонатов и водорода; f_i – коэффициенты активности ионов, определяемые из уравнения Дюбая-Хюккеля; K_1, K_2 – термодинамические константы первой и второй ступеней диссоциации; L – термодинамическое произведение активностей $CaCO_3$, $\Sigma_{ан}$ – сумма анионов без учета $[HCO_3^-]$, $[CO_3^{2-}]$, $\Sigma_{кат}$ – сумма катионов без учета $[Ca^{2+}]$, $[H^+]$.

При вычислении произведения растворимости $CaCO_3$ использовались вычисленные значения активности CO_3^{2-} , полученные из решения данной системы и экспериментальные значения активности Ca^{2+} . Для периодов открытого русла воды р. Средняя Терсь в основном содержат $CaCO_3$ в растворенном виде (ненасыщенный раствор). А воды р. Ускат в основном перенасыщены по $CaCO_3$.

Общепринятой гидрохимической процедурой является классификация вод по содержанию в них основных ионов. Такая классификация с использованием формулы Курлова для формирования схемы повторяемости образцов различных типов вод при мониторинговых измерениях приведена на рис. 5 для р. Средняя Терсь. Поскольку при отборе проб и проведении химических анализов, концентрации различных ионов определяются с погрешностями около 10 %, то программа так же позволяет выделять группы ионов с примерно одинаковыми концентрациями и оценивать вклады отдельных экспериментально выделяемых образцов вод в формирование обобщенного модельного состава рассматриваемого объекта.

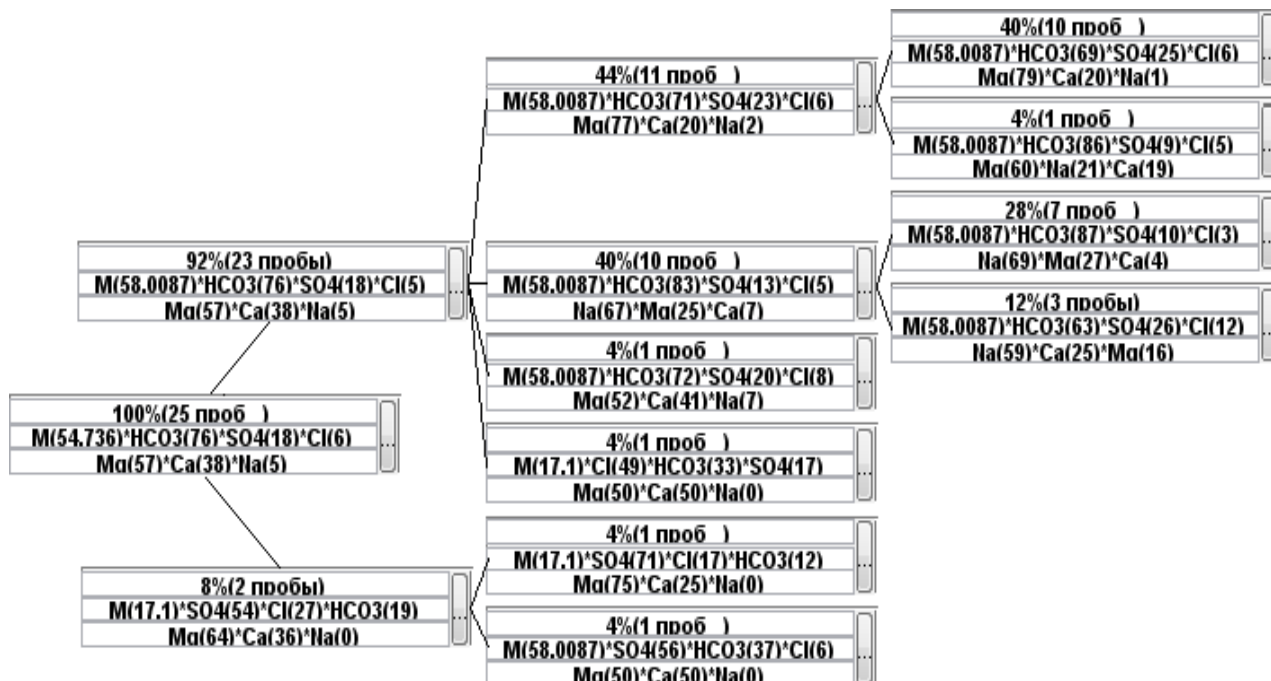


Рис. 5. Схема повторяемости для реки Средняя Терсь (половодье)

Данные рис. 6 свидетельствуют, что осредненный ионный состав вод р. Средняя Терсь в период половодья, характеризуемый как гидрокарбонат-магниево-натриевый, состоит из 40 % гидрокарбонат-сульфатных, магний-кальциевых, на 28 % из гидрокарбонат-сульфатных, натрий-магневых и на 12 % из гидрокарбонат-натриевых вод. Остальные типы вод встречаются в единичных пробах и в сумме составляют 20 %.

Создаваемый гидрохимически-ориентированный программный комплекс при обработке больших массивов экспериментальных гидролого-гидрохимических данных для различных техноприродных вод, позволяет выявлять модельные закономерности формирования ионного состава речных вод, что способствует выработке научно-обоснованных рекомендаций по совершенствованию существующих систем мониторинга.

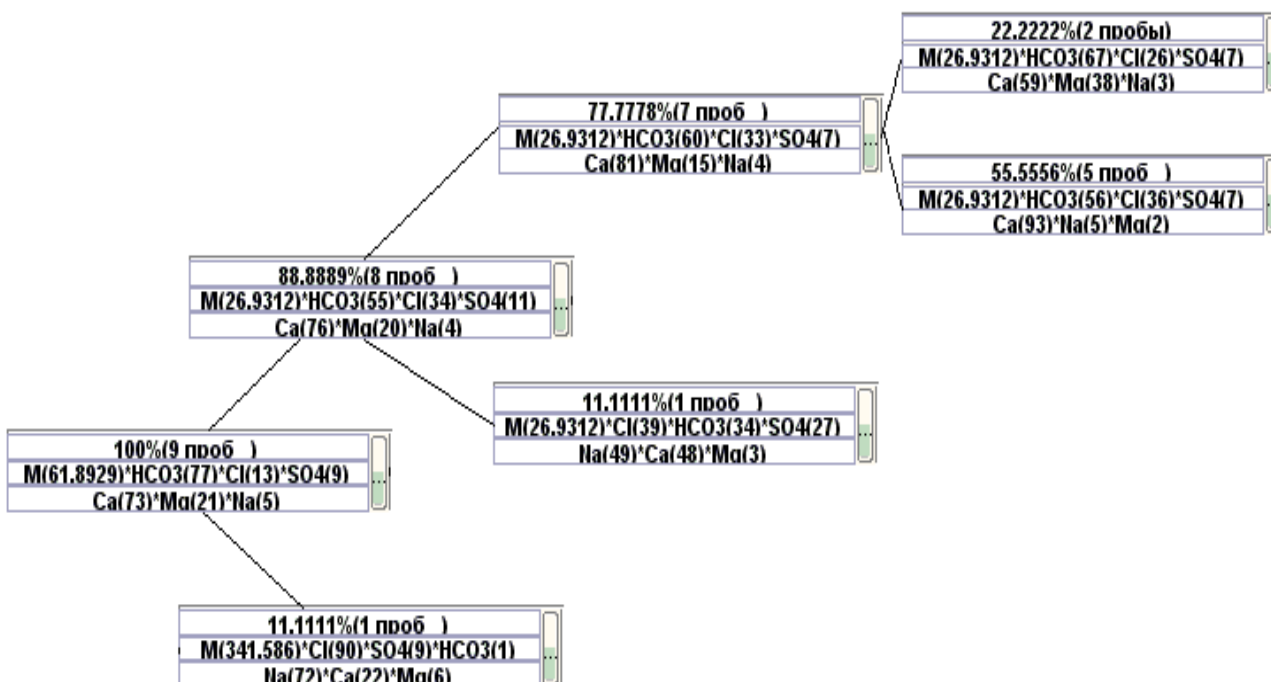


Рис. 6. Показатели повторяемости состава проб талых вод в районе расположения разреза Бунгурский Южный

Литература

1. Счастливцев, Е. Л. Проблемы современных оценок состояния поверхностных вод в угледобывающих районах и возможности совершенствования системы мониторинга техноприродных вод / Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, Н. И. Юкина // Эколого-биологические проблемы Сибири и сопредельных территорий: материалы I Международной научно-практической конференции. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2009.
2. Счастливцев, Е. Л. Гидроэкологические проблемы недропользования в Кузбассе / Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин, Н. И. Юкина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Горная книга, 2010. – № ОВ4. – 560 с.
3. Счастливцев, Е. Л. Перспективы мониторинга техноприродных вод Кузбасса / Е. Л. Счастливцев, Н. И. Юкина, С. Г. Пушкин // Материалы третьей всероссийской научной конференции с международным участием. – Барнаул: Изд-во АРТ. – 2010.
4. Счастливцев, Е. Л. Гидрологические, гидрохимические и гидрогеологические характеристики бассейна р. Бачат и района расположения ООО «Байат» / Е. Л. Счастливцев, С. Г. Пушкин // Труды Кузбасской комплексной экспедиции. Беловский, Яшкинский, Таштагольский районы Кемеровской области. – Кемерово: ИУУ СО РАН, 2004. – Т. 1.
5. Фондовые материалы Кемеровского филиала Института вычислительных технологий СО РАН.
6. Шварцев, С. Л. Гидрохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. / С. Л. Шварцев. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
7. Драйвер, Дж. Геохимия природных вод / Дж. Драйвер: пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 440 с.
8. Нормативные документы (Приказ от 18.01.2010 Росрыболовства «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»; ГН 2.1.5.1315 -03; Сан-ПиН 2.1.5.980 – 00; ДСан-ПиН 2.2.4-171-10; Сан-Пин 2.1.4.116-02.

Информация об авторах:

Счастливцев Евгений Леонидович – доктор технических наук, заведующий лабораторией Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-903-944-52-68, zavlab@icc.kemsc.ru.

Schastlivtsev Evgeniy Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Пушкин Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-913-074-99-18, pushkin@icc.kemsc.ru.

Pushkin Sergey Grigorievich – Candidate of Technical Sciences, senior researcher at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

Воротилов Артём Андреевич – аспирант, инженер-исследователь Кемеровского филиала ИВТ СО РАН, т. 8-909-513-02-48, vorotilov_a@mail.ru

Vorotilov Artem Andreevich – post-graduate student, research engineer at Kemerovo branch of the Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the RAS.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Для публикации в «Вестнике КемГУ» принимаются статьи, в которых отражаются результаты актуальных фундаментальных и прикладных научных исследований, передовых наукоемких технологий, научных и научно-методических работ, посвященных проблемам высшего образования и развитию науки в высшей школе и соответствующие тематике журнала. Представленный к публикации материал может иметь разнообразный характер: от постановки проблемных теоретических вопросов, предложений разработки новых направлений в науке до анализа результатов конкретных исследований.

Статьи принимаются в соответствии с перечнем научных направлений ВАК:

01.00.00	Физико-математические науки	10.00.00	Филологические науки
02.00.00	Химические науки	12.00.00	Юридические науки
03.00.00	Биологические науки	13.00.00	Педагогические науки
05.00.00	Технические науки	19.00.00	Психологические науки
07.00.00	Исторические науки и археология	22.00.00	Социологические науки
08.00.00	Экономические науки	23.00.00	Политология
09.00.00	Философские науки	25.00.00	Науки о земле

ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА В РЕДАКЦИЮ

1. Текст статьи представляется в редакцию на русском языке, на электронном носителе, проверенном на отсутствие вирусов, в виде файла с расширением *.doc*, построенного средствами Microsoft Word 97-2007, и одного печатного экземпляра на стандартных листах формата 210×297 мм. Иногородные авторы могут представлять указанные материалы по электронной почте vestnik@kemsu.ru. Электронная версия должна быть идентична распечатанному тексту, в случае расхождения, за основу берется печатный вариант.

2. Рекомендуемый объем статьи, включая аннотацию и список литературы, 16 – 25 тыс. знаков без пробелов.

3. Авторам материалов естественнонаучного направления необходимо дополнительно предоставить экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

4. Все статьи, поступившие в редакцию, проходят рецензирование, где анализируются актуальность темы, научная новизна и оригинальность решений, доказательная база, строгость и однозначность выводов, оснащенность научным аппаратом, качество иллюстративного материала, и публикуются по решению редакционной коллегии журнала.

5. Редакция имеет право проводить сокращения и редакционные изменения текста рукописей.

6. Работы общественно-публицистического характера к рассмотрению и публикации не принимаются.

7. Представленные статьи могут быть возвращены автору на доработку или отклонены из-за несоответствия профилю журнала, неприемлемого объема, отрицательного итога экспертизы или несоблюдения правил оформления. Рукописи, не принятые к публикации, авторам не высылаются. Гонорар за опубликованные статьи не выплачивается.

8. Не допускается свыше двух статей одного автора в одном номере журнала.

9. *Статьи аспирантов печатаются в журнале бесплатно при наличии справки из отдела аспирантуры.*

10. Статьи включаются в выпуск только после положительного решения редколлегии и предоставления копии платежного документа в редакцию журнала.

11. Представление оригинальной статьи к публикации в «Вестнике КемГУ» означает согласие авторов на передачу права автора на воспроизведение, распространение и доведение до всеобщего сведения любым способом.

СТРУКТУРА СТАТЬИ

1. Индекс универсальной десятичной классификации (УДК).

2. Название статьи.

3. Инициалы и фамилия автора (авторов).

4. Аннотация/реферат.

5. Ключевые слова.

6. Текст статьи с таблицами, рисунками, формулами.

7. Список литературы.

8. Публикуемые сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество; ученая степень, ученое звание; должность, место работы; служебные или домашние телефоны, адрес электронной почты (e-mail).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

1. Текст набирается без форматирования и нумерации страниц, с учетом абзацев и особых указаний в требованиях к оформлению статей.
2. Последовательность элементов оформления – в соответствии со структурой статьи.
3. Заголовок статьи (не более 3 строк) необходимо предоставить на русском и английском языках.
4. Инициалы и фамилия автора (авторов – через запятую).
5. Статья должна быть снабжена аннотацией на русском и английском языках. **Аннотация к статье должна быть:** информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 120 до 250 слов). **Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи:** предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.
6. Статья должна быть снабжена ключевыми словами на русском и английском языках (рекомендуемое количество ключевых слов – 5–7).
7. При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3.0 (встроенный редактор формул Microsoft Office), расположение формул на странице – по центру. Нумеровать рекомендуется лишь формулы, на которые имеются ссылки.

Например:

$$J_q^+ : q = \begin{cases} \operatorname{Re}(z_1 / z_2)i + \operatorname{Im}(z_1 / z_2)j + \\ + \frac{|z_1|^2 - |z_2|^2}{|z_1|^2 + |z_2|^2}k \mid z_2 \neq 0, \\ k \mid z_2 = 0. \end{cases} \quad (12)$$

8. Рисунки и подписи к ним располагаются непосредственно в тексте. Рисунки должны иметь формат .jpg, допускать перемещение в тексте и возможность уменьшения размеров, в черно-белой палитре.
9. Объекты, созданные средствами Microsoft Office, должны допускать возможность редактирования.
10. Таблицы нумеруются, если их число более одной.
11. Ссылки на цитируемую литературу приводятся в квадратных скобках в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «СИБИД. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Например:

Ссылка на полный текст документа [6].

Ссылка на фрагмент текста документа или статью в периодическом издании [6, с. 24 – 28].

12. Список литературы располагается после текста статьи, нумеруется (начиная с первого номера) в алфавитном порядке, предваряется словом «Литература» и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «СИБИД. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Под одним номером допустимо указывать только один источник.

13. Сокращения в тексте – по ГОСТ 7.0.12-2011 «СИБИД. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила». Допускается использование аббревиатур.

14. Примечания и сноски оформляются непосредственно в **тексте** в круглых скобках курсивом.

Например: текст (*Прим. автора: текст примечания*).

15. Внедренные шрифты, используемые в тексте статьи, предоставляются отдельными файлами.

16. На последней странице статьи указываются публикуемые сведения об авторах **на русском и английском языках:** полное название учреждения, где выполнено исследование; фамилии, имена и отчества авторов полностью; ученая степень, звание, должность, место работы, номера контактных телефонов, адрес электронной почты всех авторов.

17. На последней странице статьи должны быть подписи всех авторов.

РЕКВИЗИТЫ РЕДАКЦИИ

Адрес: 650043, Кемерово, ул. Красная, 6, редакция журнала «Вестник КемГУ»
 Телефон: (3842) 58-13-01;
 Факс: (3842) 58-38-85
 Электронный адрес: vestnik@kemsu.ru
 Адрес в Интернет: <http://www.kemsu.ru/science/bulletin.htm>

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- Периодичность выхода журнала – 4 выпуска в год. Минимальный период подписки – 3 месяца (1 выпуск).
- Подписка проводится через отделения связи по объединенному каталогу «Пресса России» по индексу 42150, по каталогу российской прессы «Почта России» по индексу 51944.
- Стоимость подписки через подписные агентства указана в соответствующих каталогах.

Редакция журнала приглашает авторов к сотрудничеству

Подробная информация на сайте издателя:

<http://www.kemsu.ru/science/bulletin.htm>

Подписано к печати 3.12.2012 г. Формат А 4.
Печать офсетная. Бумага Sveto Copy. Усл. печ. л. – 25,57. Уч.- изд. л. – 24,12.
Тираж 500 экз. Заказ № _____
Цена свободная.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет».
650043, г. Кемерово, ул. Красная, 6, <http://kemsu.ru>.

Отпечатано в ООО ПК «ОФСЕТ». 650001, Кемерово, ул. 40 лет Октября, 1б.