



Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна»

Серия «Естественные и инженерные науки»

№ 1 (33), 2016

Выходит с ноября 1996 года

Редакционный совет:

Фурсаев Д. В.
(председатель)
Багдасарьян Н. Г.
Венгер А. Л.
Капаччиоли М. (Италия)
Кореньков В. В.
Клейнер Г. Б.
Красавин Е. А.
Крюков Ю. А.
Кузнецов О. Л.
Малахов А. И.
Михайлова Н. В.
Оганесян Ю. Ц.
Островский М. А.
Сахаров Ю. С.
Черемисина Е. Н.
Черепанова В. Г.

Редакционная коллегия:

Деникин А. С.
(гл. редактор)
Савватеева О. А.
(зам. гл. редактора,
отв. секретарь)
Гладышев П. П.
Абадеев Э. М.
Борейко А. В.
Карпов А. В.
Колганова Е. А.
Каляшин С. В.
Гердт В. П.
Каманина И. З.

В номере:

<i>Архипова Е. В., Жигалин А. Д., Гусева И. С.</i> Временные вариации сейсмичности как индикатор системного сейсмогеодинамического развития регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока	3
<i>Бортновский З. В.</i> Использование данных дистанционного зондирования для тематического картографирования в районе лесозаготовок	12
<i>Воронин К. А., Сюракшина Л. А., Гладышев П. П., Юшанхай В. Ю.</i> Электронная структура гибридных органо-неорганических перовскитов	18
<i>Дацко В. С.</i> Об уравнении эволюции систем	25
<i>Леонов А. П.</i> Об анализе цифровых прецизионных позиционных САУ	32
<i>Соловьев В. О.</i> Уравнение Фридмана: вчера, сегодня, завтра	38
<i>Троян Ю. А., Рубчинский А. А.</i> Разрешение конфликтов в марковских цепях	42
<i>Хромов А. А.</i> Биотопическое распределение и связь численности ушастой совы (<i>Asio otus L.</i>) с обилием мелких млекопитающих в городских ландшафтах северного Подмосковья	48
<i>Чернов Ю. П., Вербицкая Т. А.</i> Особенности обоснования санитарно-защитной зоны для ТЭЦ	56
<i>Якушина О. А., Кожевников Д. А., Хозяинов М. С.</i> Рентгеновская микротомография в современном комплексе лабораторных методов исследования геообъектов	62

ISSN 1818-0744

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-25824 от 28 сентября
2006 г.

© Государственный университет,
«Дубна», 2016

*Все рукописи
рецензируются*

Корректор
Цепилова Ю.С.

**Макет и верстка
номера**
Цепилова Ю.С.

*Мнение редакции может
не совпадать с мнением
авторов*

Адрес редакции
141982, г. Дубна Моск. обл.,
ул. Университетская, 19
Тел.: (+7 49621)6-60-89, 1355
E-mail: izdat@uni-dubna.ru

Подписано в печать 28.04.2016.
Формат 60×90/8.
Усл. печ. л. 8,75.
Тираж 150 экз. Заказ № 13.

Отпечатано в общем отделе
университета «Дубна»
141980, г. Дубна Моск. обл.,
ул. Университетская, 19



Bulletin of Dubna International University for Nature, Society, and Man

Seria "Natural and engineering sciences"

No. 1 (33), 2016

Published since November 1996

Editorial council:

Fursaev D. V.
(Chairman)
Bagdasarjan N. G.
Capaccioli M.
Cheremisina Eu. N.
Cherepanova V. G.
Kleiner G. B.
Korenkov V. V.
Krasavin Eu. A.
Kryukov Y. A.
Kuznetsov O. L.
Malakhov A. I.
Mikhailova N. V.
Oganessian Yu. T.
Ostrovsky M. A.
Sakharov Yu. S.
Venger A. L.

Editorial board:

Denikin A. S.
(Chief Editor)
Savvateeva O. A.
(Deputy Chief Editor,
Executive Secretary)
Gladyshev P.P.
Abadeev E. M.
Boreyko A. V.
Karpov A. V.
Kolganova E. A.
Kalyashin S. V.
Gerdt V. P.
Kamanina I. Z.

In the issue:

- Arkhipova H.V., Zhigalin A.D., Guseva I.S.*
Temporal variations of seismicity as an indicator of systemic seismogeodynamic development of Eastern Siberia and the Far East 3
- Bortnovsky Z.V.*
Using of remote sensing data for thematic mapping of logging area 12
- Voronin K.A., Suyrakshina L.A., Gladyshev P.P., Yushankhai V.Yu.*
Electronic structure of hybrid organic-inorganic perovskites 18
- Datsko V.S.*
Evolution Equations Systems 25
- Leonov A.P.*
To the analysis of digital precision positional automatic control systems 32
- Soloviev V.O.*
The Friedmann equation: yesterday, today, tomorrow 38
- Troyan Y.A., Rubchinskiy A.A.*
Conflict resolution in the markov chains 42
- Khromov A.A.*
Biotopic distribution and the connection strength of long-eared owl (Asio otus L.) with an abundance of small mammals in urban landscapes of the north Moscow region 48
- Chernov Yu.P., Verbitskaya T.A.*
Establishing sanitary protection areas for cogeneration facilities: feasibility and methodology 56
- Yakushina O.A., Kozhevnikov D.A., Khozyainov M.S.*
X-ray Computed Tomography as geomatter laboratory testing technique (in geosciences) 62

ISSN 1818-0744

Certificate of Registration
No. ПИ № ФС77-25824
of 28 September 2006

© Dubna State University, 2016

All manuscripts are reviewed

Proof-reader
Tcepilova J. S.

Issue make-up
Tcepilova J. S.

The opinion of publishing author not
always coincides with the editorial
opinion

Editorial board address:
19 Universitetskaya St., 141982 Dubna,
Moscow Region, Russia
Phone: (+7 49621)6-60-89, 1355
E-mail: izdat@uni-dubna.ru

Passed for printing
on 28.04.2016
150 copies

Е. В. Архипова, А. Д. Жигалин, И. С. Гусева

Временные вариации сейсмичности как индикатор системного сейсмогеодинамического развития регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока

На основе данных выборок из каталога USGS в период с 1973 по 2014 гг. построены временные ряды, отражающие вариации активности землетрясений в пределах регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири. Выяснилось, что для временного хода землетрясений этих регионов прослеживается синхронизация периодов пиковой активности, которая в наибольшей степени характерна для отдельных сейсмоактивных уровней. Выявленная синхронизация свидетельствует о наличии системного единства проявлений сейсмичности на северо-востоке Евразии. Полученные данные важны для среднесрочного прогноза сейсмической опасности и своевременного принятия мер для предупреждения природных и природно-техногенных катастроф.

Ключевые слова: временные вариации числа землетрясений, сейсмическая опасность, каскадное развитие природно-техногенных процессов.

Об авторах

Архипова Елена Витальевна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологии и наук о Земле Государственного университета «Дубна».

Жигалин Александр Дмитриевич — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), доцент кафедры экологии и природопользования Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

Гусева Ирина Сергеевна — магистр кафедры экологии и наук о Земле Государственного университета «Дубна».

Геоэкологические проблемы, связанные с освоением регионов

В первые десятилетия XXI в. структура национальной экономики России переориентируется на интенсивное развитие Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Государственная программа «Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 года» предусматривает развитие потенциала региона в таких направлениях, как расширение добычи минерального сырья, строительство крупных инфраструктурных объектов — магистрального газопровода «Сила Сибири», железнодорожной магистрали, электростанций, расширение транспортной сети.

В связи с истощением углеводородных месторождений Западной Сибири особое значение приобретает Восточно-Сибирская нефтегазоносная провинция, которая вклю-

чает Красноярский край, Республику Саха (Якутия) и Иркутскую область. В «Энергетической стратегии России на период до 2020 года», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1234-р от 28 августа 2003 г., указывается на необходимость перераспределения добычи углеводородов из Западной Сибири по другим регионам страны и, в частности, в пределы Восточной Сибири. Большинство месторождений этого региона открыты еще в 70-е гг. XX в., но их разработка не производилась из-за сурового климата, сложного геологического строения и высокой твердости древних нефтеносных пород кембрийского, вендского и позднерифейского возраста, а также из-за пространственной разобщенности отдельных месторождений, неразвитой транспортной инфраструктуры и недостатка персонала.

В соответствии с Программой создания в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке единой системы добычи, транспортировки газа и газоснабжения с учетом экспорта газа на рынки Китая и других стран

АТР объемы добычи нефти в Восточной Сибири и Якутии с 2005 до 2020 гг. должны увеличиться в 20 раз. С 1999 г. происходит наращивание добычи углеводородов в районе Иркутского амфитеатра Восточной Сибири, и в первое десятилетие XXI в. объем добычи нефти и газоконденсата резко возрастает. Добыча нефти в Иркутской области в 2006 г. составляла 0,157 млн тонн, а в 2010 г. она достигает уже 5,8 млн тонн. Общая протяженность скважин поискового бурения увеличивается с 14 тыс. м в 2006 г. до 29,15 тыс. м в 2010 г., разведочного бурения — с 3,17 до 22,45 тыс. м соответственно [6]. Определяющая роль в активизации нефтедобычи в Восточной Сибири принадлежит прокладке нефтепровода «Восточная Сибирь — Тихий Океан» (ВСТО), первая очередь которого запущена в октябре 2009 г. Наиболее близко к сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоне (БРС), на расстоянии около 500 км к северо-западу от северной оконечности оз. Байкал, расположено Ярактинское месторождение нефти и газоконденсата. Энергетической стратегией предусмотрено также освоение открытого в 1987 г. Ковыктинского газоконденсатного месторождения в Иркутской области. Месторождение расположено в 350 км к северо-востоку от г. Иркутск и неподалеку от впадины Среднего Байкала — наиболее сейсмоопасного участка БРС, где 9-балльные зоны располагаются вдоль линии дельта р. Селенги — о. Ольхон. Вблизи месторождения планируется строительство крупного подземного хранилища газа.

Освоение регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири осложняется тем, что эти территории относятся к области интенсивной современной геодинамической активности и широкого распространения потенциально опасных геологических процессов, способных повлиять на сохранность инженерных сооружений и коммуникаций, объектов повышенной опасности. Наиболее значимым фактором эндогенной активности является сейсмичность. Землетрясения, в особенности сильные, способны причинить ощутимый ущерб, связанный с разрушением материальных объектов, гибелью людей, химическим загрязнением окружающей среды, каскадной активизацией опасных экзогенных природных и природно-техногенных процессов. Среди экзогенных геологических процессов наиболее потенциально опасными

представляются лавины и сели п-ова Камчатка и о. Сахалин; в долине р. Лена и в гг. Олёкминск и Ленск широко распространены карстовые процессы; на севере Камчатского п-ова и в Восточной Сибири заметно проявляются геокриологические процессы.

Активная добыча нефти и газа, строительство подземных хранилищ могут привести к нарушению геодинамического равновесия и спровоцировать проявление индуцированных землетрясений. Чуткая реакция геологической среды на внешние воздействия в Восточной Сибири известна по возникновению наведенной сейсмичности в результате создания системы водохранилищ Байкало-Ангарского каскада [1; 3]. Дискуссионным остается вопрос о природе Нефтегорского землетрясения 1995 г. на о-ве Сахалин. Исследование сейсмичности регионов и выявление пространственно-временных закономерностей ее поведения является первоочередной задачей, направленной на сокращение ущерба от прямых и косвенных эффектов, связанных с землетрясениями.

Современные геодинамические обстановки проявлений сейсмичности

Природа сейсмичности регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири имеет свои специфические особенности, связанные со строением и геодинамическим развитием отдельных территорий, а также с современными сеймотектоническими процессами. Байкальская рифтовая система (БРС) возникла на месте Саяно-Байкальского сводового поднятия в южной краевой части Восточно-Сибирской платформы под действием активных тектонических движений, начавшихся в эоцене-олигоцене и продолжающихся в настоящее время. Главная впадина БРС, а также ее западные, восточные и юго-восточные высокие горные хребты расположены над прочной и достаточно мощной литосферой окраины Сибирской платформы. Современное развитие сейсмического Саяно-Байкальского пояса происходит в условиях СЗ-ЮВ растяжения и сопровождается сейсмогенными подвижками по разломам сложной кинематики с преобладающим сбросо-сдвиговым компонентом. Сейсмоявления в районе Иркутского амфитеатра Восточно-Сибирской платформы и БРС связаны с формированием протяженной межблоковой границы на юге Сибирского кратона и сосредоточены в диапазоне глубин до

40 км [4]. Высокая геодинамическая активность БРС подтверждается также газовыми эманациями в зонах разломов и проявлениями гидротермальной активности.

Олекмо-Становая зона разломов (ОСЗ) расположена на территории Алдано-Станового региона, протягивается субширотно с запада на восток и представляет собой зону многочисленных сейсмоактивных сдвигов северо-западного и северо-восточного простирания. Формирование мегаструктур БРС и ОСЗ связывают с единым процессом сжатия и поворота Амурской микроплиты по часовой стрелке, в связи с которым к северо-западу от Амурской микроплиты, в пределах БРС, реализуется обстановка растяжения и сдвига, а к юго-востоку, в пределах ОСЗ, — обстановка сжатия и сдвига [2].

Сейсмоактивные структуры Курило-Камчатской островной дуги сформировались в процессе поддвига Тихоокеанской литосферной плиты под Евроазиатскую. Связанные с этим процессом сейсмопроявления рассредоточены в широком диапазоне глубин, формируя сейсмофокальную зону с отчетливым максимумом числа очагов на уровне нижней коры. Сейсмическая активность о-ва Сахалин на уровне коры связана с зонами продольных взбросов и сбросов субмеридионального простирания, разделяющих хребты и межгорные впадины, и поперечных, трансорогенных левых сдвигов северо-западного простирания и правых сдвигов северо-восточного простирания. Глубокофокусные землетрясения о. Сахалин, по-видимому, связаны с продолжающейся на запад Курило-Камчатской сейсмофокальной зоной [4].

Несмотря на весьма существенные различия структурного плана, кинематических характеристик активных разломов, пространственной локализации очагов землетрясений и особенностей геодинамического развития, сравнительный анализ временных вариаций сейсмичности главных мега-

структур Дальнего Востока и Восточной Сибири позволяет обнаружить в современном сейсмотектоническом развитии этих регионов признаки системного единства.

Методика и результаты исследования временных вариаций сейсмичности

Для оценки временных тенденций в изменении сейсмичности на основе каталога *USGS* были сформированы выборки сейсмических событий с магнитудой от 4 за период с 1973 по 2014 гг. для БРС, ОСЗ, п-ова Камчатки, Курильских о-вов и о-ва Сахалин [5]. По данным выборок построены временные ряды пятилетних и годовых сумм землетрясений, а также ряды пятилетних сумм землетрясений со скользящим осреднением и сдвигом в один год (рис. 1—7). Подобные ряды рассчитаны как для регионов в целом, так и для отдельных наиболее сейсмоактивных горизонтов на уровне верхней коры (10—15 км), нижней коры (30—35 км), верхней мантии (>100 км). Их сопоставление позволило выявить регионы с синхронным или близким по времени изменением сейсмичности, а также уровни литосферы, в пределах которых вариации сейсмичности дают основание предполагать наличие единого «управляющего начала».

Временные ряды годовых сумм землетрясений

При сопоставлении временных рядов годовых сумм землетрясений оказалось, что близкое совпадение намечается только в двух случаях — для Олекмо-Становой зоны разломов и Байкальской рифтовой системы на уровне верхней коры с коэффициентом корреляции $Q = 0,75$ (см. рис. 1) и для временных рядов нижнекоровых землетрясений Курильских о-вов и о. Сахалин — с $Q = 0,8$ (см. рис. 2). Близкий годовой ход количества землетрясений этих регионов для каждого из случаев обусловлен, по-видимому, сходством геодинамических условий протекания сейсмического процесса.

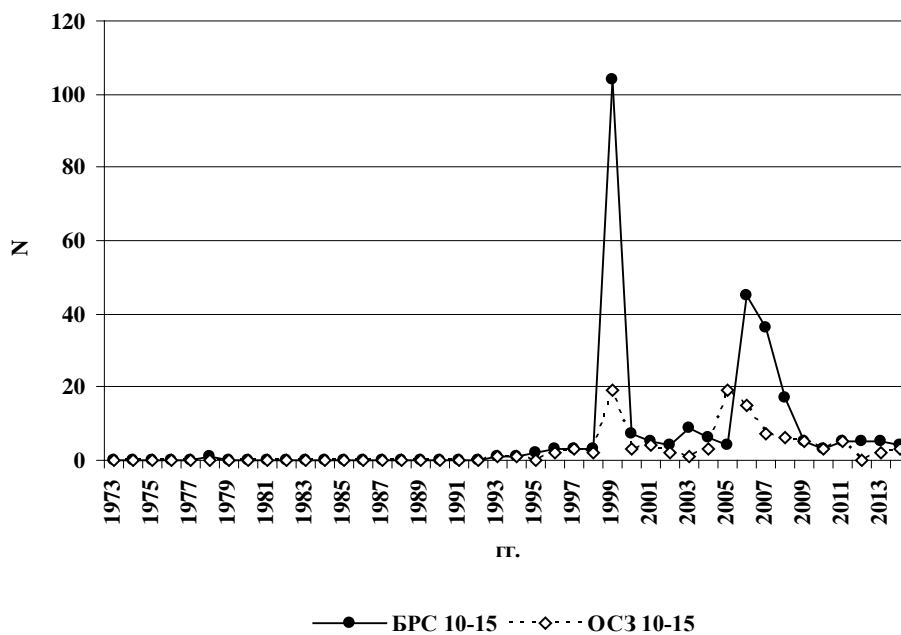


Рис. 1. Изменение годового количества землетрясений на уровне верхней коры с 1973 по 2014 гг. $Q = 0,75$

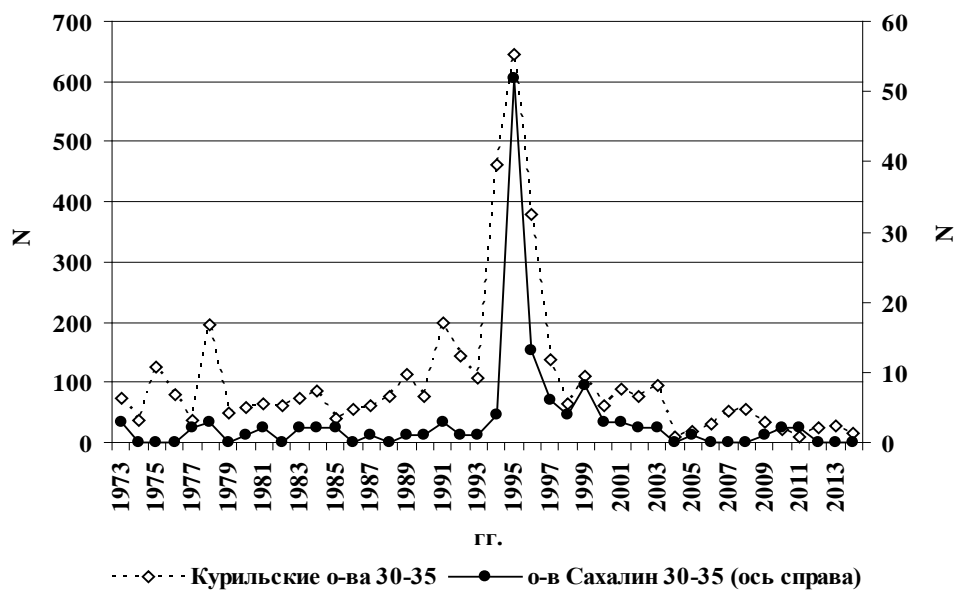


Рис. 2. Изменение годового количества землетрясений на уровне нижней коры с 1973 по 2014 гг. $Q = 0,8$

Временные ряды пятилетних сумм землетрясений

При сопоставлении временных рядов пятилетних сумм выявлено 7 высоких коэффициентов корреляции со значениями от 0,65 до 0,98 (табл. 1), что свидетельствует о совпадении долговременных тенденций в изменении числа землетрясений для большинства регионов как на уровне нижней, так и на уровне верхней коры. Графики времен-

ных рядов на рис. 3 и 4 демонстрируют высокое совпадение тенденций в пределах каждого из этих уровней, однако поскольку ряды имеют малое количество точек, в данном случае их не стоит рассматривать как значимые и можно использовать лишь для приблизительной качественной оценки тенденций в изменении активности землетрясений.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции пятилетних сумм землетрясений на уровнях максимальной активности

	БРС 10—15 км	п-ов Кам- чатка 30—35 км	Курильские о-ва 10—15 км	Курильские о-ва 30—35 км	ОСЗ 10—15 км	ОСЗ 30—35 км	о. Сахалин 10—15 км	о. Сахалин 30—35 км
БРС 10—15 км		-0,08	0,54	-0,27	0,92	0,20	0,97	-0,07
п-ов Камчатка 30—35 км	-0,08		-0,25	0,96	-0,14	0,48	0,06	0,98
Курильские о-ва 10—15 км	0,54	-0,25		-0,27	0,78	-0,50	0,65	-0,22
Курильские о-ва 30—35 км	-0,27	0,96	-0,27		-0,27	0,39	-0,11	0,95
ОСЗ 10—15 км	0,92	-0,14	0,78	-0,27		-0,14	0,95	-0,09
ОСЗ 30—35 км	0,20	0,48	-0,50	0,39	-0,14		0,13	0,38
о. Сахалин 10—15 км	0,97	0,06	0,65	-0,11	0,95	0,13		0,08
о. Сахалин 30—35 км	-0,07	0,98	-0,22	0,95	-0,09	0,38	0,08	

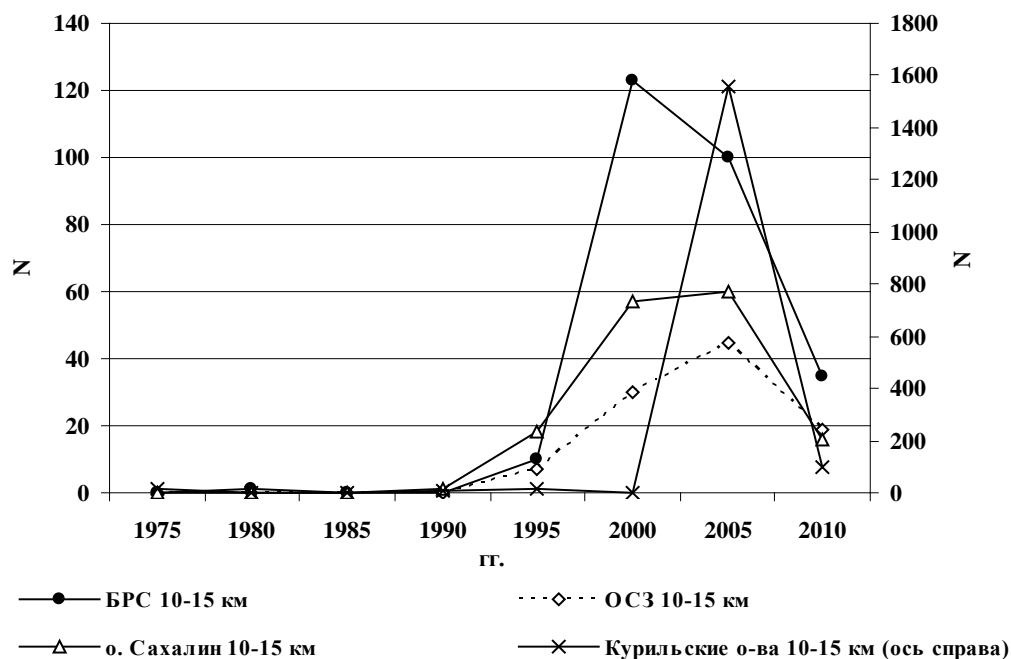


Рис. 3. Вариации пятилетних сумм землетрясений на уровне верхней коры с 1973 по 2012 гг. (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

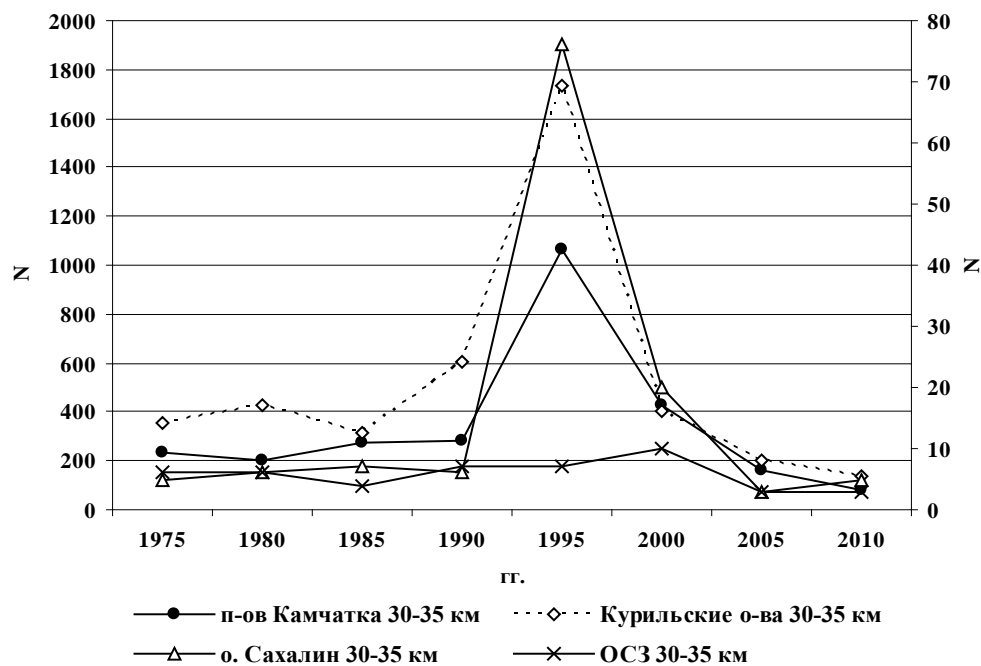


Рис. 4. Вариации пятилетних сумм землетрясений на уровне нижней коры с 1973 по 2012 гг. (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

Временные ряды землетрясений со скользящим осреднением по 5 годам. Сопоставлением годового количества землетрясений с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам и сдвигом в 1 год

выявлено более трети высоких значимых коэффициентов корреляции, которые подтверждают близкое совпадение долговременных вариаций сейсмичности регионов на каждом из уровней (табл. 2, 3, рис. 5—7).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции годовых сумм землетрясений со скользящим осреднением по пяти годам на уровнях максимальной активности в пределах верхней и нижней коры

	БРС 10—15 км	п-ов Камчатка 30—35 км	Курильские о-ва 10—15 км	Курильские о-ва 30—35 км	ОСЗ 10—15 км	ОСЗ 30—35 км	о. Сахалин 10—15 км	о. Сахалин 30—35 км
БРС 10—15 км		0,26	0,54	-0,14	0,89	0,21	0,85	0,1
п-ов Камчатка 30—35 км	0,26		-0,33	0,7	0,05	0,73	0,1	0,82
Курильские о-ва 10—15 км	0,54	-0,33		-0,31	0,77	-0,4	0,54	-0,24
Курильские о-ва 30—35 км	-0,14	0,7	-0,31		-0,24	0,37	-0,18	0,92
ОСЗ 10—15 км	0,89	0,05	0,77	-0,24		-0,08	0,86	-0,03
ОСЗ 30—35 км	0,21	0,73	-0,4	0,37	-0,08		-0,05	0,46
о. Сахалин 10—15 км	0,85	0,1	0,54	-0,18	0,86	-0,05		0,02
о. Сахалин 30—35 км	0,1	0,82	-0,24	0,92	-0,03	0,46	0,02	

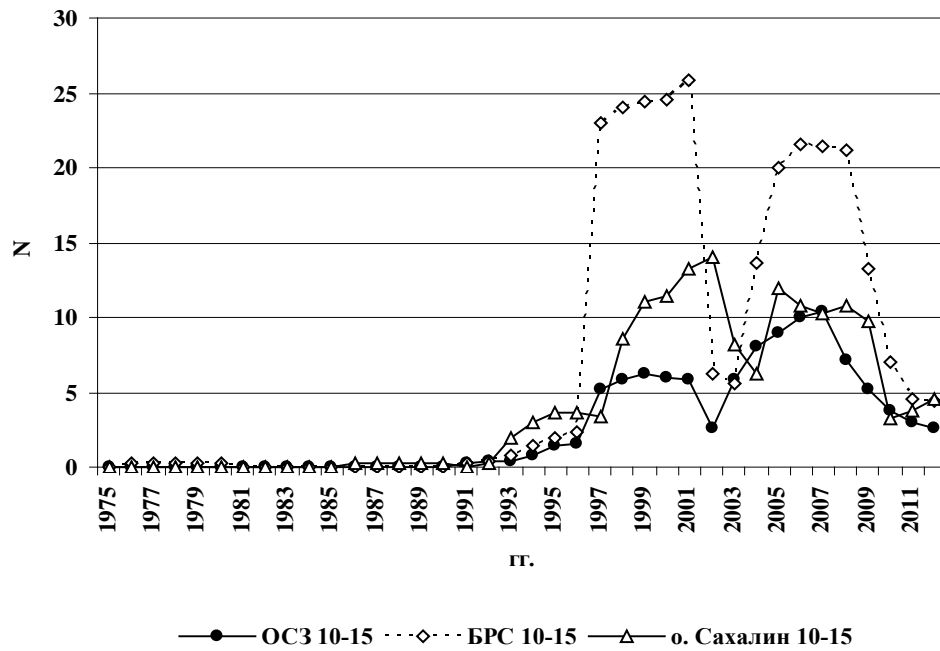


Рис. 5. Вариации количества верхнекоровых землетрясений с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

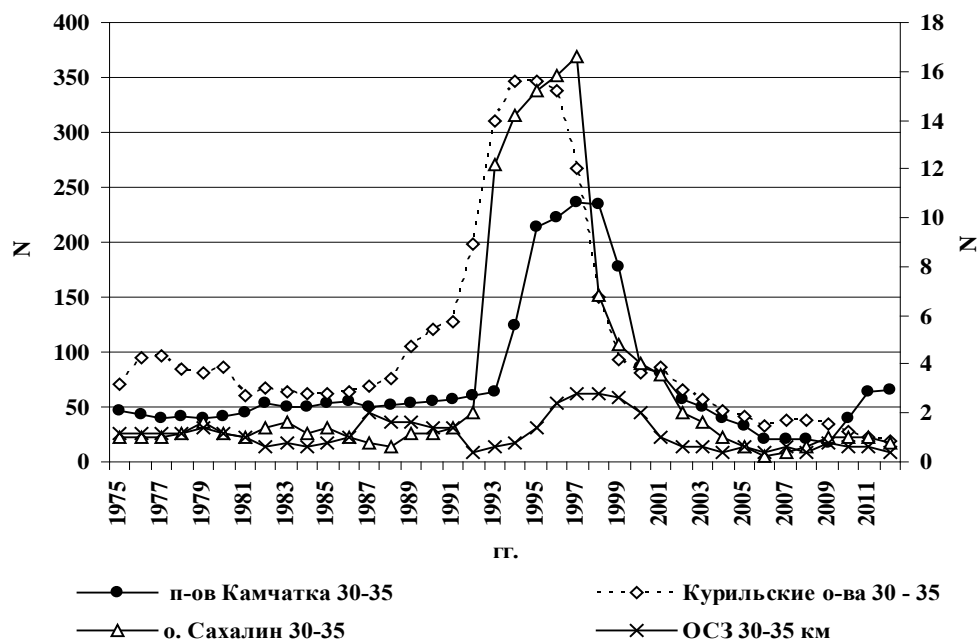


Рис. 6. Вариации количества верхнекоровых землетрясений с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

Таблица 3. Коэффициенты корреляции годовых сумм землетрясений со скользящим осреднением по пяти годам для временных рядов мантийных землетрясений с глубинами очагов более 100 км

	п-ов Камчатка	Курильские о-ва	о. Сахалин
п-ов Камчатка		0,98	0,96
Курильские о-ва	0,98		0,94
о. Сахалин	0,96	0,94	

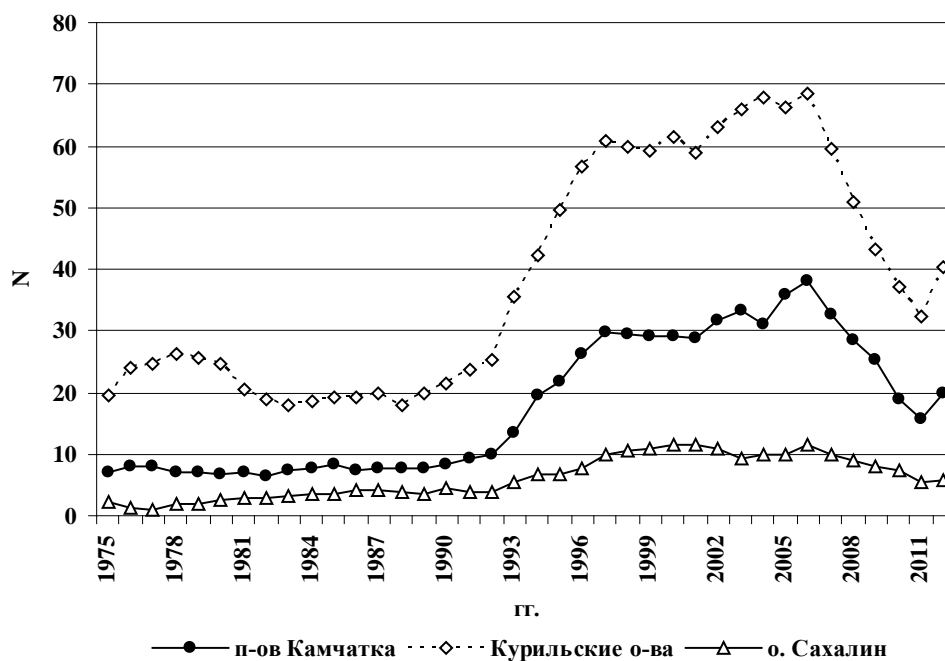


Рис. 7. Вариации количества мантийных землетрясений регионов в обрамлении Северо-Западной Пацифики с 1973 по 2014 гг. со скользящим осреднением по 5 годам, сдвиг 1 год; $h \geq 100$ км, $M \geq 4$ (на горизонтальной оси обозначена середина пятилетнего интервала)

Обсуждение результатов и выводы

При сопоставлении временных рядов числа землетрясений, построенных в разных масштабах осреднения, выяснилось, что распределение сейсмических событий во времени неравномерно. Отмечаются как периоды относительных затиший, так и периоды пиковой активизации, которые возможно синхронизировать. Наличие синхронных всплесков для определенных регионов и уровней литосферы свидетельствует, что вариации сейсмичности не являются хаотичными автоколебаниями — они представляют собой отчетливый «пульс» современных геодинамических процессов.

Наиболее впечатляющим оказалось сопоставление временных рядов пятилетних сумм землетрясений на различных глубинных уровнях (см. табл. 1, рис. 1, 2). Выяснилось, что при данном масштабе осреднения одновременная активизация и затухание активности землетрясений наблюдается в период с 1998 по 2007 гг. для БРС, ОСЗ, о. Сахалин и Курильских о-вов на уровне верхней коры (см. рис. 3). Для нижней коры такая активизация начинается несколько раньше, с 1993 и завершается в 2002 г., одновременно для о-ва Сахалин, п-ва Камчатка и Курильских о-вов (см. рис. 4). Тенденции, намеченные для пятилетних сумм, подтверждаются

и при сопоставлении годового хода землетрясений со скользящим осреднением по 5 годам (табл. 2, 3, рис. 5—7). В особенности близкое совпадение характерно для мантийных землетрясений Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны и о. Сахалин, мантийные землетрясения которого локализуются на продолжении этой зоны в направлении Евразийского континента.

Выявленная синхронность сейсмических вариаций свидетельствует о наличии тесной взаимосвязи геодинамических процессов, управляющих развитием этих крупных сейсмоактивных объемов литосферы и проявляющих себя в синхронных вариациях на уровне отдельных сейсмоактивных горизонтов. В плане сейсмической активизации каждая из оболочек ведет себя согласованно и независимо от смежных. Вместе с тем, периоды активизации для каждой из оболочек не совпадают и возможны ситуации, когда высокая активность на одном из уровней «накладывает запрет» на активизацию смежных уровней. Полученная информация может быть использована для среднесрочного прогноза сейсмической опасности рассмотренных регионов Дальнего Востока и Восточной Сибири и своевременного принятия мер для предупреждения природных и природно-техногенных катастроф, связанных с увеличением активности землетрясений.

Библиографический список

1. Голенецкий, С. И. Наведенная сейсмичность в районе Иркутского водохранилища у юго-западной оконечности озера Байкал / Геология и геофизика. — 1997. — Т. 38, № 10. — С. 1692—1698.

2. Имаев, В. С. Сейсмоструктура Олекмо-Становой сейсмической зоны (Южная Якутия) / В.С. Имаев, Л.П. Имаева, Б.М. Козьмин // Литосфера. — 2005. — № 2. — С. 21—40.

3. Павленов, В. А. Проблемы наведенной сейсмичности Ангарского каскада ГЭС / В.А. Павленов, Е.Н. Черных // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии : сборник статей. Вып. 1. Ин-т

зем. коры СО РАН. — Иркутск : Изд-во Ин-та зем. коры СО РАН, 2004. — С. 190—196.

4. Семинский, К. Ж. Сейсмичность юга Сибирской платформы: пространственно-временная характеристика и генезис / К.Ж. Семинский, Я.Б. Радзиминович // Физика Земли. — 2007. — № 9. — С. 18—30.

5. <http://earthquake.usgs.gov> — Мировой каталог землетрясений Геологической службы США (Earthquake Data Base USGS). — Электрон. дан. — URL: <http://earthquake.usgs.gov> (дата обращения: 08.09.2015 г.).

6. Они были первыми // Нефть и капитал. 2007. — № 4. — Электрон. дан. — URL: http://www.oilcapital.ru/edition/nik/archives/nik_2006/nik_04_2007/107441/public/107481.shtml (дата обращения: 07.10.2015 г.).

*Поступила в редакцию
25.03.2016*

УДК 911:528.7

З. В. Бортновский**Использование данных дистанционного зондирования для тематического картографирования в районе лесозаготовок**

Рассматриваются возможности использования данных дистанционного зондирования для выявления особенностей ландшафтного покрова. Представлены результаты тематического картографирования для территории, трансформированной лесозаготовками.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, тематическое картографирование, организация природопользования.

Об авторах

Бортновский Захар Васильевич — инженер кафедры экологии и наук о Земле Государственного университета «Дубна».

Вследствие хозяйственной деятельности человека естественный ландшафтный покров может претерпевать существенные изменения. Пример источника подобных трансформаций — лесозаготовки методом сплошных рубок. Выявление изменений вследствие этой деятельности — ключ к оценке, а при необходимости — к корректировке проводимых мероприятий. Одним из современных инструментов решения подобных задач являются данные дистанционного зондирования (ДДЗ). Их обработка позволяет относительно оперативно и регулярно получать информацию о состоянии окружающей среды, в том числе в виде аналоговых или цифровых картографических материалов, которые могут использоваться в процессе принятия управленческих решений.

Характеристика района исследования

Рассмотренная территория общей площадью немногим менее 1500 км² располагается на северо-западе Вологодской области, охватывая северо-восточную часть Вытегорского муниципального района, граничащую с Республикой Карелия на севере и Архангельской областью на востоке (рис. 1). Район относится к центральной и южной частям Андомской возвышенности. Он находился в области Валдайского оледенения, рельеф холмисто-моренный, пологохолмистый (высшая точка 298 метров). В пределах рассматриваемого участка под ледниковыми и водноледниковыми отложе-

ниями верхнеплейстоценового возраста залегают отложения каменноугольной системы. Гидрографическая сеть относится к трем бассейнам стока: Балтийского, Каспийского и Белого морей. Климат умеренно-континентальный с преобладанием осадков над испарением. Распространены подзолистые почвы. Коренная растительность среднетаежная с преобладанием еловых лесов [1]. Вместе с тем вследствие лесозаготовок растительный покров претерпел значительные изменения [5].

Исследованный участок отличается отсутствием действующих населенных пунктов и сельскохозяйственных земель, которые в настоящее время сосредоточены преимущественно западнее и юго-западнее (ближе к районному центру и транспортным путям). Важно наличие в пределах исследуемого района трех комплексных ландшафтных заказников — особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального значения. Эти заказники — «Верхне-Андомский», «Сойдозерский» и «Атлека» (обозначены соответственно «1», «2», «3» на рис. 3 и 4) — по литературным данным [2; 4] сохранили черты коренных древостоев, которыми ранее была покрыта большая часть Андомской возвышенности. Так, Г.А. Воробьев и В.С. Куликов отмечают, что «в год основания Верхне-Андомского ландшафтного заказника (был создан в 1983 г. первым среди указанных — прим. авт.) дальше на восток, вплоть до границы Вологодской области с Архангельской, на многие километры простиралась тайга» [2]. Однако лесные территории, юридически не защищенные от про-

мышленных лесозаготовок, подвергались постепенным вырубкам. Для анализа этого

процесса были привлечены ДДЗ.

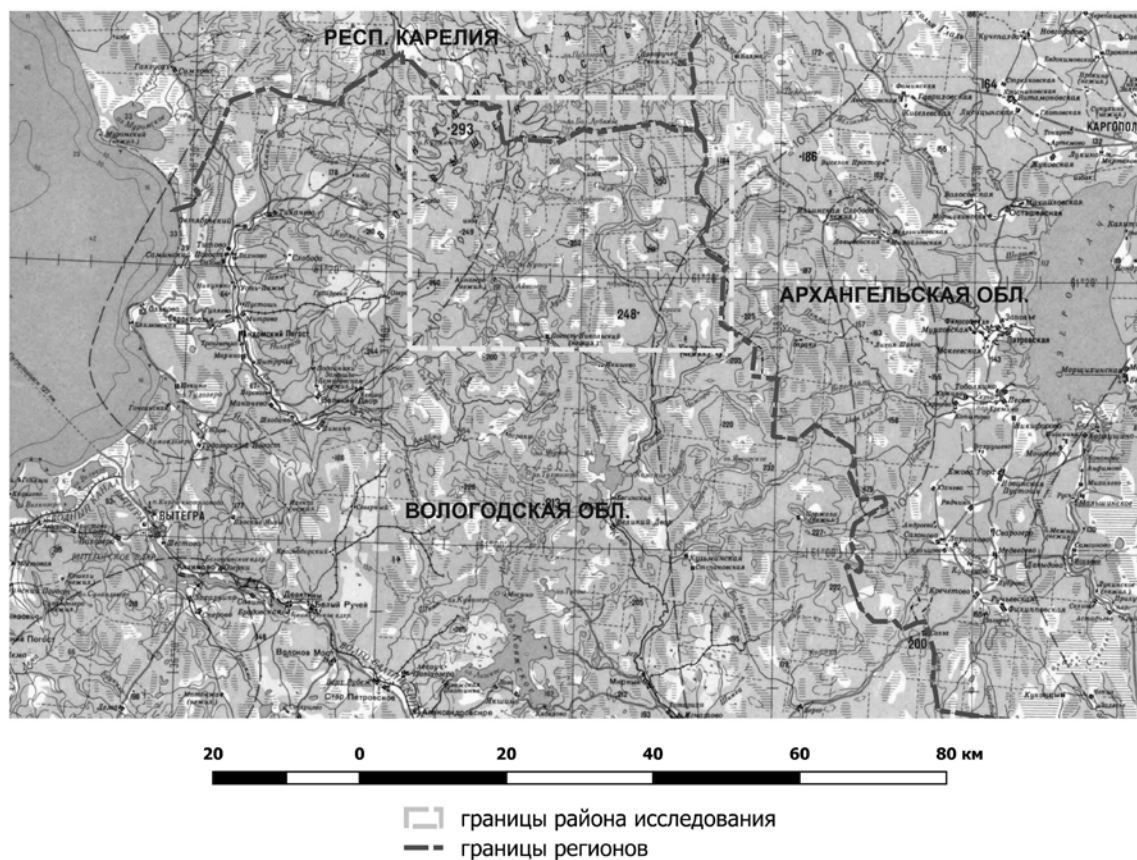


Рис. 1. Расположение района исследования

Методика исследования

Исходными материалами исследования послужили современные и архивные данные спутниковой съемки *Landsat*. Выбор этих данных обусловлен не только доступностью, но и возможностью привлечения архивных материалов, сравнимых по качеству (в том числе по пространственному и спектральному разрешению) с современными. В архиве *EarthExplorer USGS* были выбраны снимки *Landsat 5* и *Landsat 8* за 1985 и 2015 гг., что позволило отследить изменения за 30-летний промежуток времени.

Первичные данные *Landsat* (сцена) представляют собой набор снимков территории в различных спектральных диапазонах (каналах). Различные комбинации каналов позволяют получать синтезированные цветные снимки, с помощью которых воз-

можно проводить первичное визуальное дешифрирование.

Обработка ДДЗ производилась с использованием геоинформационной системы *QGIS*. Для создания по многозональному снимку картосхемы ландшафтного покрова в *QGIS* использовался дополнительный модуль полуавтоматической классификации (*Semi-automatic classification plugin*). Принцип его работы состоит в задании пользователем обучающих выборок — «эталонов» соответствующих классов, на основании спектрального образа которых происходит подразделение всей территории. Важным фактором качества классификации является репрезентативность ключевых участков, которые уточняются на местности (рис. 2) и/или с использованием снимков высокого пространственного разрешения.



Рис. 2. Субкоренной хвойный лес (Верхне-Андомский заказник) и лиственный молодняк на бывшей вырубке (юго-восточнее Сойдозерского заказника) (фото автора)

Наиболее важным для данной работы было выделение класса субкоренных хвойных лесов, которые представляют основной интерес для лесозаготовителей, подвергаясь рубкам. Соответственно были выделены классы «вырубки», «мелколиственные леса», «смешанные леса», которые обобщенно отображают различные стадии сукцессионных процессов. При этом следует отметить, что границы этих классов относительно условны, поскольку фазы сукцессии сменяются плавно. В дополнение к указанным выделялись более «статичные» классы болот, заболоченных лесов (без подразделения по

типам) и озер (для снимка 1985 г. определен класс «облачность», имеющий минимальное распространение).

После создания обучающей выборки производилась непосредственно классификация, в ходе которой каждый пиксель изображения соотносился с «эталоном» выделенных классов. Существует несколько алгоритмов соотнесения, в данной работе был использован метод максимального правдоподобия (*maximum likelihood*). Результат классификации для снимков 1985 и 2015 гг. представлен на рис. 3, 4.

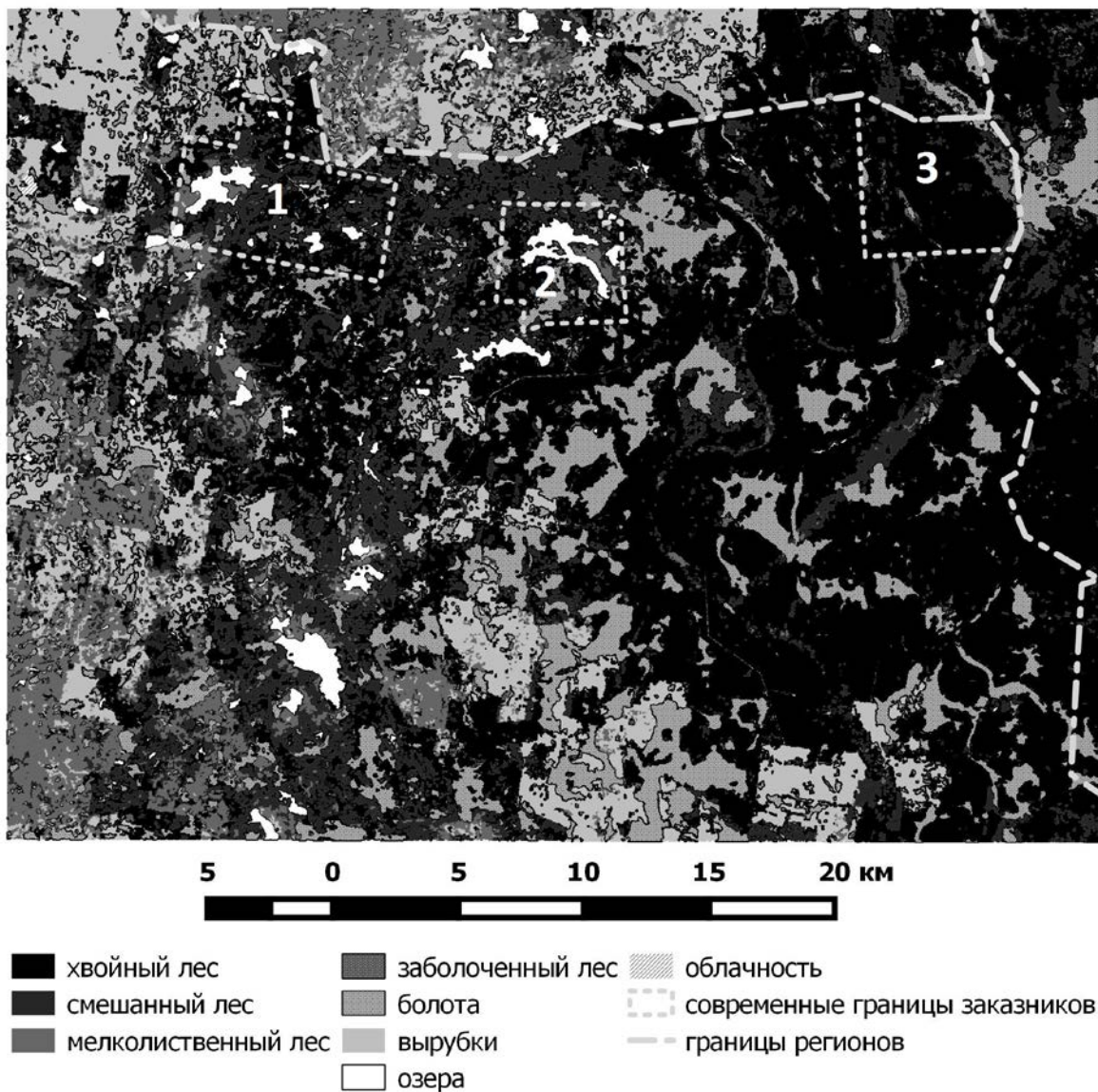


Рис. 3. Картограмма ландшафтного покрова на 1985 г.

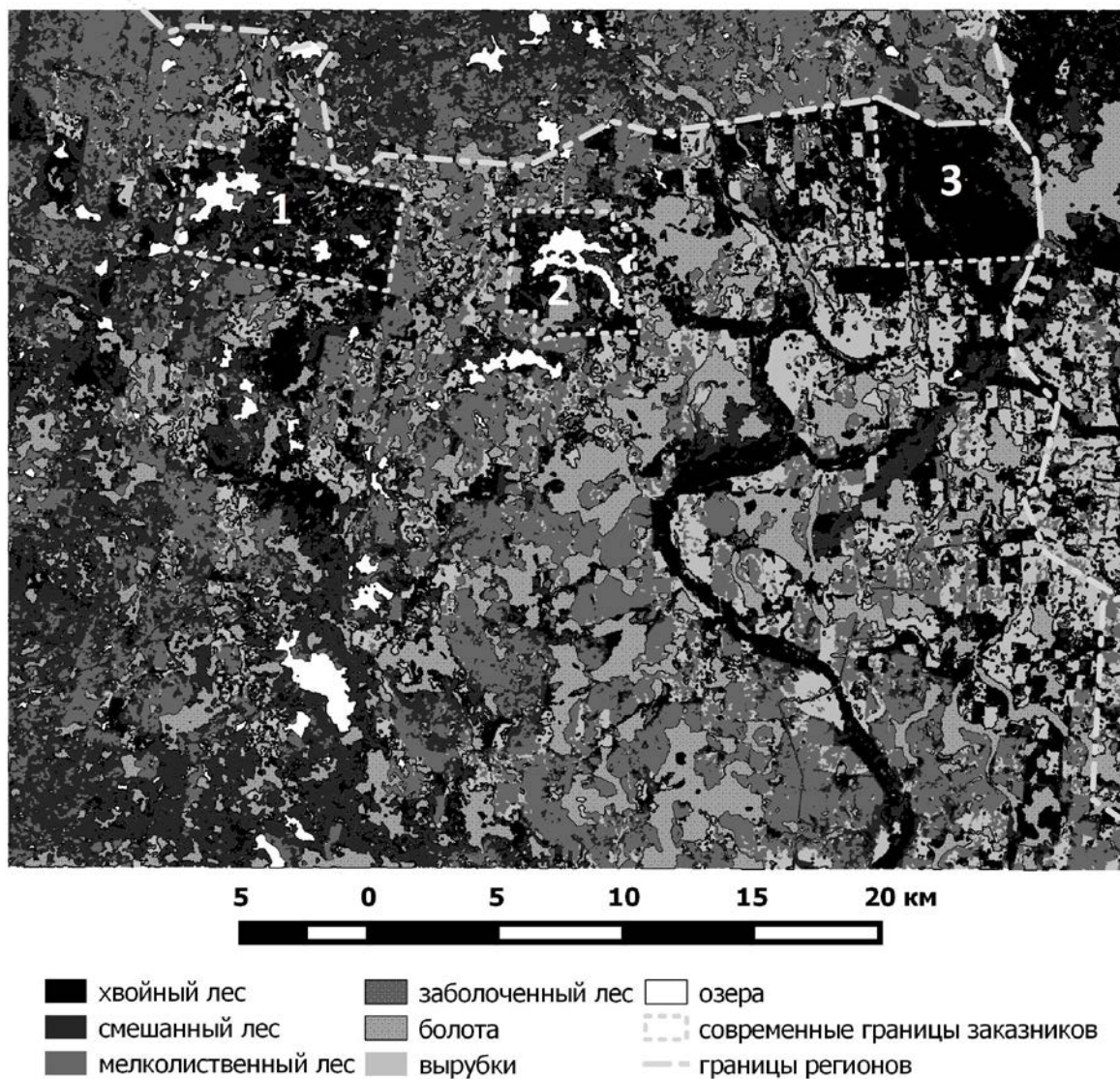


Рис. 4. Картограмма ландшафтного покрова на 2015 г.

Выводы

По результатам тематического картографирования по разновременным снимкам прослеживается «генеральное» направление рубок от ключевых транспортных коммуникаций (западнее и юго-западнее рассматриваемого участка проходят межрегиональная автодорога и Волго-Балтийский канал) на восток. Коренные хвойные леса вне границ ландшафтных заказников и водоохранных зон рек в значительной степени утрачены. Сопоставление статистических показателей классификации спутниковых снимков позволяет отметить более чем двукратное сокращение площади коренных хвойных лесов в пределах рассмотренного участка за последние 30 лет. Их относительная доля, пре-

вышавшая в 1985 г. 40 %, снизилась к 2015 г., составив менее 20 %.

К настоящему времени рубки подступили к границам заказника «Атлека» и административным границам региона. Это является дополнительным аргументом для диверсификации местной экономики. «Компенсацией» возможного изменения количественных и качественных показателей лесозаготовки может стать увеличение доли и «глубины» переработки древесины именно на местном уровне. Это тем более актуально, учитывая, что по данным 2011 г. объемы только первичной переработки древесины составляли менее половины (!) от объема лесозаготовок, осуществляемых на территории муниципального района [3].

Следует отметить потенциал территории для развития рекреации, экологического туризма, что обусловлено относительной удаленностью от крупных промышленных центров, наличием участков естественных ландшафтов, а также географической уникальностью «Атлеки», расположенной на месте сопряжения трех бассейнов стока: Атлантического и Северного Ледовитого океанов, а также Каспийского моря. Вместе с тем в этой сфере важен экологический контроль и регулирование, поскольку чрезмерная туристско-рекреационная (в т. ч. инфраструктурная) нагрузка может привести к деградации ландшафта, уже потенциально ослабленного из-за фрагментации вследствие вырубок.

Представляется возможным рекомендовать к сохранению еще оставшиеся участки субкоренных лесов, не имеющих в настоящее время защиты от рубок. Эти участки, особенно между заказниками «Сойдозерский» и «Атлеки», могут выполнять буферные функции и служить элементами «экологического коридора» между существующими ООПТ.

В целом исследование показывает возможность применения ДДЗ для целей тематического картографирования. Получаемые таким образом материалы могут служить элементом информационного обеспе-

чения в практике осуществления хозяйственной деятельности.

Библиографический список

1. Атлас Вологодской области / ГОУ ВПО «Вологодский государственный педагогический университет». Гл. ред. Е. А. Скупинова. – СПб. – Череповец: ФГУП «Аэрогеодезия» – Порт-Апрель, 2007.
2. Вытегра: краеведческий альманах. Выпуск 2 / Администрация Вытегорского района Вологодской обл., Вытегорский краеведческий музей, Вологодский государственный педагогический университет. Гл. ред. Е.А. Скупинова. – Вологда: Легия, 2000.
3. Инвестиционный паспорт Вытегорского муниципального района [Электронный ресурс]. – URL: http://www.invest35.ru/assets/files/docs/invest_pasporta/Vytegra.pdf. Режим доступа: свободный. Дата обращения: 28.08.2015.
4. Леса земли Вологодской / В.И.Антонов, Л.Н.Беляев, Г.А.Воробьев и др. Северное государственное лесостроительное предприятие, Вологодский государственный педагогический университет. – Вологда: Легия, 1999.
5. Особо охраняемые природные территории, растения и животные Вологодской области / Вологодский государственный педагогический институт и др. Отв. ред. Г.А. Воробьев. – Вологда: Русь, 1993.

Поступила в редакцию
25.03.2016

УДК 538.915

К. А. Воронин, Л. А. Сюракшина, П. П. Гладышев, В. Ю. Юшанхай**Электронная структура гибридных органо-неорганических перовскитов**

Впервые сформулирована мультиорбитальная модель, описывающая универсальные электронные свойства широкого семейства галогенидных перовскитов ABX_3 , где $A = Cs, NH_4, CH_3NH_3$; $B=Sn, Pb$; $X=Cl, Br, I$. Проведен теоретический анализ локальной электронной структуры и электронного зонного спектра отдельных представителей семейства.

Ключевые слова: электронная структура, мультиорбитальная модель, фотоэлектрические преобразователи, солнечные элементы, гибридные органо-неорганические перовскиты.

Об авторах

Воронин Кирилл Андреевич — аспирант кафедры химии, новых технологий и материалов Государственного университета «Дубна».

Гладышев Павел Павлович — доктор химических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой химии, новых технологий и материалов по научной работе Государственного университета «Дубна», главный научный сотрудник Центра высоких технологий ФГУП НИИ прикладной акустики.

Юшанхай Виктор Юлиевич — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, профессор кафедры теоретической физики Государственного университета «Дубна».

Сюракшина Людмила Александровна — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований.

Построение электронной модели галогенидного перовскита ABX_3 мы основываем на приближении сильной связи между атомными орбиталями элемента в позиции B ($= Sn, Pb$) и октаэдрически координированных с ним галогенами $X = Cl, Br, I$. Химическая связь в неорганическом остове перовскита, образованном октаэдрами BX_6 с общими вершинами по трем ортогональным направлениям, имеет ионно-ковалентный характер. В основном состоянии и в пределе ионной связи катион B^{2+} находится в электронной конфигурации ns^2np^0 ($n=5$ для Sn и $n=6$ для Pb), а анион X^{1-} — в конфигурации $n's^2n'p^6$ ($n'=3,4,5$ соответственно для Cl, Br, I). Модель ковалентной связи включает в себя s -, p - и d -орбитали элемента B и полный набор p -орбиталей галогенов, образующих σ - и π -связи с орбиталями элемента B . Как неоднократно отмечалось в литературе [2—6], роль однозарядных сферических катионов Cs^+ , NH_4^+ и полярных катионов метиламмония $[CH_3NH_3]^+$ в позициях A сводится, в основ-

ном, к стабилизации перовскитной решетки, а их заполненные и пустые электронные уровни далеко отстоят от энергетических полос, отвечающих валентной зоне и зоне проводимости.

Фиксация значений параметров модели, а именно, энергий ϵ различных орбиталей, параметров гибридизации t различных пар соседних орбиталей основаны, во-первых, на общих принципах электронной теории [1] и, во-вторых, на представленных в литературе [2—6] результатах расчёта электронных зон в галогенидных перовскитах на основе современных методов теории функционала плотности (ТФП). Хорошо известно, что несмотря на свою плодотворность, методы ТФП имеют ряд существенных ограничений, связанных, в основном, с произволом в выборе аналитической формы обменно-корреляционных потенциалов при расчёте конкретных материалов. В этой связи, построение и исследование эвристических электронных моделей, подобных развиваемой в нашем исследовании, позволяют выявить многие детали электронной структуры, скрытые в ТФП вычислениях, но не-

обходимые для анализа физических свойств конкретного материала.

Формулировка модели

На первом этапе рассмотрим перовскитную решетку с кубической точечной симметрией O_h . Именно такой симметрией обладает высокотемпературная фаза галогенидных перовскитов ABX_3 . Эффекты понижения симметрии решетки $O_h \rightarrow C_{4h}$ при переходе в тетрагональную фазу будут учтены на заключительном этапе расчетов зонного спектра.

Для каждого узла решетки \vec{l} можно выделить октаэдр лигандов X , расположенных в узлах $\vec{l} \pm \frac{\vec{a}_x}{2}$, $\vec{l} \pm \frac{\vec{a}_y}{2}$ и $\vec{l} \pm \frac{\vec{a}_z}{2}$, где \vec{a}_x , \vec{a}_y

и \vec{a}_z — элементарные векторы трансляции. В каждой позиции X одну из трех p -орбиталей следует рассматривать как σ -орбиталь, а две — как π -орбитали. Так, σ -орбитали $\left| p_x(\vec{l} \pm \frac{\vec{a}_x}{2}) \right\rangle$, $\left| p_y(\vec{l} \pm \frac{\vec{a}_y}{2}) \right\rangle$ и $\left| p_z(\vec{l} \pm \frac{\vec{a}_z}{2}) \right\rangle$ образуют σ -связи с орбиталями $\left| S(\vec{l}) \right\rangle$ и $\left| P_\alpha(\vec{l}) \right\rangle$, где $\alpha=x,y,z$ соответственно. В качестве примера на рис. 1 показаны две σ -орбитали и четыре π -орбитали лигандов, гибридные с орбиталью $\left| P_x(\vec{l}) \right\rangle$ центрального атома.

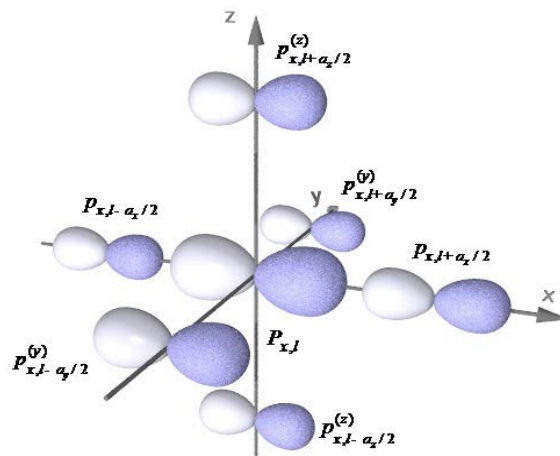


Рис. 1. Репрезентативный пример орбитали $\left| P_{x,\vec{l}} \right\rangle$, образующей две σ связи с параметрами $+t_{pp}$ в направлении $\pm x$, и четыре π -связи с параметром $-t_{p\pi}$ в направлениях $\pm y$, $\pm z$

Приведенные выше аргументы позволяют сформулировать мультиорбитальную модель сильной связи в представлении вторичного квантования с использованием операторов рождения и уничтожения электронов в следующем виде (q — квазиимпульс, заданный в первой зоне Бриллюэна):

$$H = \sum_q (H_o(q) + \sum_{ab} H_{hyb}(q)), \text{ где}$$

$$H_o = \varepsilon_S S_q^+ S_q + \varepsilon_P \sum_\alpha P_\alpha^+(q) P_\alpha(q) +$$

$$+ \varepsilon_P \sum_\alpha p_\alpha^+(q) p_\alpha(q) + \varepsilon_\pi \sum_{\alpha \beta \neq \alpha} \pi_\beta^{(\alpha)+}(q) \pi_\beta^{(\alpha)}(q) +$$

$$+ \varepsilon_D (D_{xy}^+(q) D_{xy}(q) + D_{xz}^+(q) D_{xz}(q) +$$

$$+ D_{yz}^+(q) D_{yz}(q)),$$

$$H_{hyb} = 2it_{sp} \sum_\alpha \sin \frac{q_\alpha}{2} S_\alpha^+(q) p_\alpha(q) +$$

$$+ 2t_{pp} \sum_\alpha \cos \frac{q_\alpha}{2} P_\alpha^+(q) p_\alpha(q) -$$

$$- 2t_{pp}^{(-)} \sum_{\alpha \beta \neq \alpha} \sin \frac{q_\alpha}{2} \sin \frac{q_\beta}{2} p_\alpha^+(q) p_\beta(q) -$$

$$- 2t_{pp}^{(+)} \sum_{\alpha \beta \neq \alpha} \cos \frac{q_\beta}{2} P_\alpha^+(q) \pi_\alpha^\beta(q) +$$

$$+ 2t_{p\pi} \sum_{\alpha \beta \neq \alpha} \cos \frac{q_\alpha}{2} \cos \frac{q_\beta}{2} P_\alpha^+(q) \pi_\alpha^\beta(q) +$$

$$+ 2it_{pp}^{(-)} \sum_{\alpha \beta \neq \alpha} \sin \frac{q_\alpha + q_\beta}{2} (\pi_\alpha^{\beta+}(q) \pi_\beta^\alpha(q)) +$$

$$+ 2it_{dn} \sum_{\alpha} \sum_{\beta \neq \alpha} \sin \frac{q_{\alpha}}{2} (D_{\alpha\beta}^{+}(q) \pi_{\alpha}^{\beta}(q)) + h.c.,$$

где $t_{pp}^{(-)} = 1/2 t_{pp}^{\sigma}$, $t_{pp}^{(+)} = 3/2 t_{pp}^{\sigma}$. Данная модель не учитывает спин-орбитальное взаимодействие (COB) в p - и d -оболочках атомов Pb и Sn .

Модельные вычисления и их сравнения с результатами ТФП

Далее представлены результаты расчета на основе этой модели электронного зонного спектра в $CzSnI_3$ и $MaPbI_3$. Результаты модельного расчета сравниваются со спектрами, представленными в литературе и полученными методами ТФП. В следующем разделе обсуждаются эффекты включения в модель спин-орбитального взаимодействия. На рис. 2, 3 показаны зонные спектры (без учета COB), полученные для $CzSnI_3$ соответственно методами ТФП и из модельных

расчетов. Из сравнения следует, что модель воспроизводит результаты ТФП не только в основных чертах, но и во многих деталях.

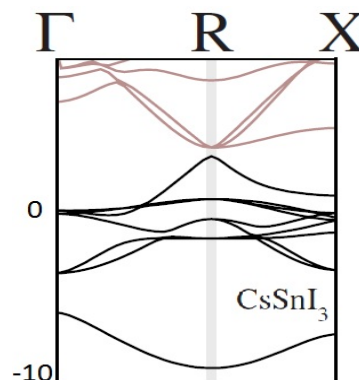


Рис. 2. Теоретический зонный спектр (без учета COB), полученный методами ТФП для $CzSnI_3$ (адаптировано из [2])

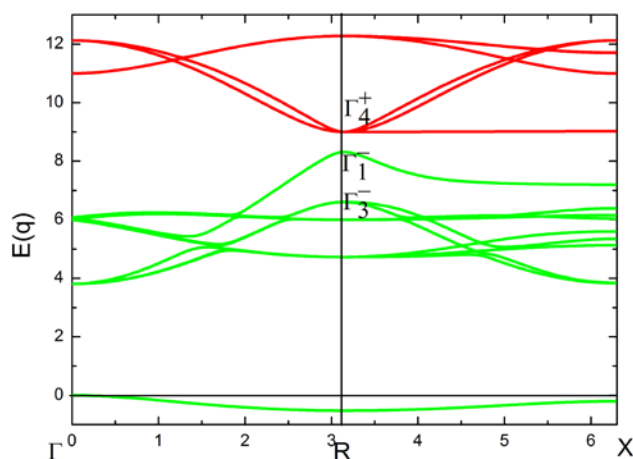


Рис. 3. Расчетный зонный спектр (без учета COB) для $CzSnI_3$ с указанием орбитальной симметрии волновых функций электронных состояний в точке R зоны Бриллюэна

Данные расчета электронных зон для $MaPbI_3$, выполненные с учетом COB методами ТФП, представлены на рис. 4.

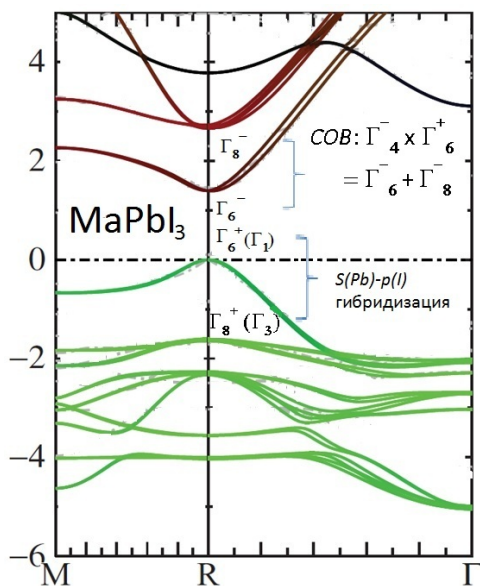


Рис. 4. Зонный спектр, полученный для MaPbI_3 методами теории функционала плотности с учетом СОВ (адаптировано из [3]). Нами установлена симметрия (тип представления Γ) волновых функций электронных состояний в точке R зоны Бриллюэна и добавлен текстовый комментарий, указывающий на источники расщепления ветвей спектра (слабодисперсная ветка в области низких энергий, ниже -6эВ , здесь не показана)

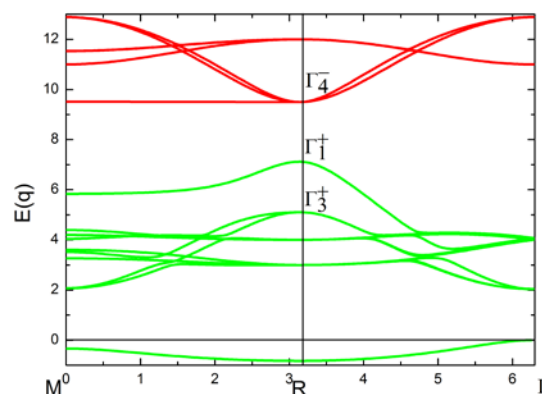


Рис. 5. Модельный (без учета СОВ) зонный спектр для MaPbI_3 с указанием симметрии волновых функций электронных состояний в точке R зоны Бриллюэна. В минимуме зоны проводимости состояния трехкратно вырождены

Таблица 1. Параметры модели, использованные для расчетов электронных зонных спектров (энергии орбиталей отсчитываются от уровня $\epsilon_s = 0$)

	ϵ_p	ϵ_p	ϵ_π	ϵ_D	t_{sp}	t_{pp}	t_{pp}^σ	$t_{p\pi}$	$t_{D\pi}$	λ
CzSnI_3 (рис. 4)	9	7	6	11	2	0,6	0,3	0,15	1	0
MaPbI_3 (рис. 6)	9,5	5,5	4	11	2,5	0,7	0,3	0,15	1	0
MaPbI_3 (модель с учетом СОВ, рис. 6)	9,5	5,5	–	–	2,5	0,7	–	–	–	1,1

Эффекты спин-орбитального взаимодействия и тетрагонального искажения структуры решетки

Включение СОВ перепутывает спиновые и орбитальные степени свободы независимо в p и d оболочках Pb, так что новые электронные состояния этих оболочек строятся из базисных функций произведения двух представлений. Например, для p оболочки имеем $\Gamma_4^- \times \Gamma_6^+ = \Gamma_6^- + \Gamma_8^-$, где указано разложение произведения на два неприводимых представления в случае кубической симметрии. Набор базисных функций произведения $\Gamma_4^- \times \Gamma_6^+$ определяются как $|P_\alpha(\vec{l}; \sigma)\rangle = |P_\alpha(\vec{l})\rangle \cdot |X_\sigma(1/2)\rangle$, где $|P_\alpha(\vec{l})\rangle$ —

определенные ранее орбитальные функции представления Γ_4^- , а $|X_\sigma(1/2)\rangle$ — спиновые

функции представления Γ_6^+ . Тогда локальные базисные функции двумерного и четырехмерного представлений, соответственно Γ_6^- и Γ_8^- , находим стандартным способом

$$|P_i(1/2, \gamma)\rangle = \sum_\sigma \sum_\alpha |P_{\alpha,i}; \sigma\rangle \langle 1/2 \sigma \Gamma_4 \alpha | \Gamma_6 \gamma \rangle,$$

где $\gamma = \pm 1/2$, и

$$|Q_i(3/2, \gamma)\rangle = \sum_\sigma \sum_\alpha |P_{\alpha,i}; \sigma\rangle \langle 1/2 \sigma \Gamma_4 \alpha | \Gamma_8 \gamma \rangle,$$

где $\gamma = \pm 1/2, \pm 3/2$, и $\langle 1/2 \sigma \Gamma_4 \alpha | \Gamma_{6,8} \gamma \rangle$ — коэффициенты Клебша — Гордана кубической

группы O_h . Найденные функции диагонализуют гамильтониан СОВ $H_{SO} = \lambda \vec{L}_i \vec{S}_i$ на каждом узле, так что состояния дублета $|P_i(1/2, \gamma)\rangle$ сдвигаются по энергии вниз на величину $-\lambda$, а состояния квартета $|Q_i(3/2, \gamma)\rangle$ — вверх на величину $+\lambda/2$.

Используя новые переменные и переходя от узельного к (квази)импульсному пространству, получаем, что размерность матрицы полного гамильтониана удваивается до 32. Диагонализация такой матрицы и расчёт зонного спектра не приводит к принципиальным трудностям. Анализ численных результатов позволяет сделать вывод о том, что включение СОВ приводит к а) значительному уменьшению ширины запрещенной зоны, б) существенной перестройке структуры зоны проводимости, но при этом в) слабо воздействует на электронные состояния внутри валентной зоны и г) практически не влияет на состояния у верхнего края валентной зоны. Причина такого слабого влияния СОВ на верхние валентные состояния производные от $p(\sigma)$ орбиталей лигандов

$$H_0 = \varepsilon_S \sum_{q\sigma} S_{q\sigma}^+ S_{q\sigma} + (\varepsilon_P - \lambda) \sum_{q\uparrow} P_q^+(1/2, \gamma) P_q(1/2, \gamma) + (\varepsilon_P + \lambda/2) \sum_{q\downarrow} Q_q^+(3/2, \gamma) Q_q(3/2, \gamma) + \varepsilon_p \sum_{\alpha} \sum_{q\sigma} P_{\alpha, q\sigma}^+ P_{\alpha, q\sigma},$$

$$H_{hyb} = 2it_{sp} \sum_{\alpha} \sum_{q\sigma} \sin(\frac{q_{\alpha}}{2}) S_{q\sigma}^+ P_{\alpha, q\sigma} + 2t_{pp} \sum_q \{ \cos(\frac{q_x}{2}) p_{x, q\uparrow}^+ [-\frac{1}{\sqrt{3}} P_q(1/2, -1/2) + \frac{1}{\sqrt{6}} Q_q(3/2, -1/2) + \frac{1}{\sqrt{2}} Q_q(3/2, 3/2)] +$$

$$+ \cos(\frac{q_x}{2}) p_{x, q\downarrow}^+ [-\frac{1}{\sqrt{3}} P_q(1/2, 1/2) + \frac{1}{\sqrt{6}} Q_q(3/2, 1/2) + \frac{1}{\sqrt{2}} Q_q(3/2, -3/2)] + \cos(\frac{q_y}{2}) p_{y, q\uparrow}^+ [\frac{i}{\sqrt{3}} P_q(1/2, -1/2) -$$

$$- \frac{i}{\sqrt{6}} Q_q(3/2, -1/2) + \frac{i}{\sqrt{2}} Q_q(3/2, 3/2)] + \cos(\frac{q_y}{2}) p_{y, q\downarrow}^+ [-\frac{i}{\sqrt{3}} P_q(1/2, 1/2) + \frac{i}{\sqrt{6}} Q_q(3/2, 1/2) + \frac{i}{\sqrt{2}} Q_q(3/2, -3/2)] +$$

$$+ \cos(\frac{q_z}{2}) p_{z, q\uparrow}^+ [\frac{1}{\sqrt{3}} P_q(1/2, 1/2) + \frac{\sqrt{2}}{3} Q_q(3/2, 1/2)] + \cos(\frac{q_z}{2}) p_{z, q\downarrow}^+ [\frac{1}{\sqrt{3}} P_q(1/2, -1/2) + \frac{\sqrt{2}}{3} Q_q(3/2, -1/2)] \} + h.c.$$

На рис. 6 показан зонный спектр редуцированной модели, рассчитанный с параметрами $\varepsilon_S = 0$; $\varepsilon_P = 9.5$; $\varepsilon_p = 5.5$; $t_{sp} = 2.5$; $t_{pp} = 0.7$; $\lambda = 1.1$ эВ. Ранее вырожденная, при $\lambda = 0$, нижняя ветвь зоны проводимости расщепляется на нижнюю ветвь дублета и верхнюю ветвь квартета с относительным расстоянием $\approx 3/2\lambda$ между ними.

Отметим, что одноэлектронные состояния в точке R зоны Бриллюэна классифицируются по представлению точечной группы O_h как локальные состояния узлов B .

обусловлена ослаблением их связи с волновыми состояниями зоны проводимости

$$|P_q(1/2, \gamma)\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_i e^{iqi} |P_i(1/2, \gamma)\rangle$$

$$|Q_q(3/2, \gamma)\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_i e^{iqi} |Q_i(3/2, \gamma)\rangle \quad (1)$$

Вблизи R точки зоны Бриллюэна. Действительно $t_{pp} \cos(q_{\alpha}/2) \rightarrow 0$ при $q_{\alpha} \rightarrow \pi$.

Перестройка структуры зоны проводимости может быть рассчитана с гамильтонианом матрицей в пространстве состояний редуцированным до размерности 14. Такое пространство состояний включает в себя два вектора $|S(q); \sigma\rangle$ и шесть векторов (1), производных от S и p орбиталей Pb , а также шесть векторов $|p_{\alpha}(q); \sigma\rangle$ ($\alpha = x, y, z$), производных от p состояний лигандов. Гамильтониан редуцированной модели имеет вид $H = H_0 + H_{hyb}$, где

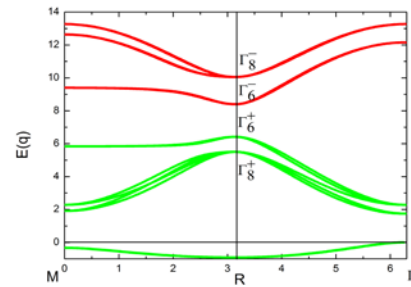


Рис. 6. Расчетный зонный спектр для редуцированной модели MaPbI_3 с учетом СОВ и указанием симметрии волновых функций электронных состояний в точке R зоны Бриллюэна

В отсутствие СОВ набор из шести исходных волновых функций с учетом спина $\sigma = \uparrow, \downarrow$ у дна зоны проводимости в точке

$R = (\pi, \pi, \pi)$ определяется следующим образом ($\alpha = x, y, z$):

$$|P_{\alpha, R}; \sigma\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_i (-1)^{\sum_{\beta} l_{\beta}} |P_{\alpha, i}; \sigma\rangle,$$

где суммирование ведется по узлам $\vec{l} = \sum_{\beta} l_{\beta} \vec{e}_{\beta}$ кубической решетки, и эти состояния с энергией ε_P полностью вырождены. Спин-орбитальное взаимодействие $\lambda \sum_i \vec{L}_i \vec{S}_i$ расщепляет их на дублет

$$\begin{aligned} |P_R(1/2; 1/2)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} |P_{x, R}; \downarrow\rangle - \frac{i}{\sqrt{3}} |P_{y, R}; \downarrow\rangle - \frac{1}{\sqrt{3}} |P_{z, R}; \uparrow\rangle, \\ |P_R(1/2; -1/2)\rangle &= -\frac{1}{\sqrt{3}} |P_{x, R}; \uparrow\rangle - \frac{i}{\sqrt{3}} |P_{y, R}; \uparrow\rangle - \frac{1}{\sqrt{3}} |P_{z, R}; \downarrow\rangle, \\ |Q_R(3/2; 1/2)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{6}} |P_{x, R}; \downarrow\rangle + \frac{i}{\sqrt{6}} |P_{y, R}; \downarrow\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}} |P_{z, R}; \uparrow\rangle, \\ |Q_R(3/2; -1/2)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{6}} |P_{x, R}; \uparrow\rangle + \frac{i}{\sqrt{6}} |P_{y, R}; \uparrow\rangle + \sqrt{\frac{2}{3}} |P_{z, R}; \downarrow\rangle, \\ |Q_R(3/2; 3/2)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} |P_{x, R}; \uparrow\rangle - \frac{i}{\sqrt{2}} |P_{y, R}; \uparrow\rangle, \\ |Q_R(3/2; -3/2)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} |P_{x, R}; \downarrow\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}} |P_{y, R}; \downarrow\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

Аналогично, набор исходных волновых функций у потолка валентной зоны в точке R определяется как

$$|P_{\alpha, R}; \sigma\rangle = \frac{i}{\sqrt{N}} \sum_i (-1)^{\sum_{\beta} l_{\beta}} |P_{\alpha, i + \frac{\alpha}{2}}; \sigma\rangle. \quad (3)$$

Поскольку эти состояния преобразуются по чётному представлению, они не гибридизируют с (2), но гибридизируют с $|S_R; \sigma\rangle$ с параметром $\sim t_{sp}$. Гибридизация снимает кубическое вырождение состояний (3) и расщепляет их на спиновый дублет $\Gamma_6^+ = \Gamma_1^+ \cdot \Gamma_6^+$ и квартет $\Gamma_8^+ = \Gamma_3^+ \cdot \Gamma_6^+$, волновые функции которых имеют вид

$$\begin{aligned} |\tilde{\Psi}_R(\Gamma_1); \sigma\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{\alpha} |P_{\alpha, R}; \sigma\rangle \\ |\Psi_R(\Gamma_3, e_1); \sigma\rangle &= \frac{1}{\sqrt{6}} [2|P_{z, R}; \sigma\rangle - |P_{x, R}; \sigma\rangle - |P_{y, R}; \sigma\rangle] \\ |\Psi_R(\Gamma_3, e_2); \sigma\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} [|P_{x, R}; \sigma\rangle - |P_{y, R}; \sigma\rangle]. \end{aligned}$$

Квартетные состояния вырождены и лежат на энергии ε_p . Смешивание полностью симметричных орбиталей $|S_R\rangle$ и $|\tilde{\Psi}_R\rangle$ формирует волновое состояние в максимуме валентной зоны (представление Γ_6^+ на рис. 6) с энергией $\varepsilon_p + 3t_{sp}^2 / \varepsilon_p$ и волновой функцией (рис. 7):

$|P_R(1/2; j = \pm 1/2, \pm 3/2)\rangle$ с энергией $(\varepsilon_P - \lambda)$ и квартет $|Q_R(3/2; j = \pm 1/2, \pm 3/2)\rangle$ с энергией $(\varepsilon_P + \lambda/2)$, где $\lambda \approx 1.1$ эВ для Pb.

Волновые функции дублета и квартета преобразуются по представлениям, соответственно Γ_6^- и Γ_8^- , и выражаются через $|P_{\alpha, R}; \sigma\rangle$ следующим образом ($q=R$):

$$|\Psi_R(\Gamma_1); \sigma\rangle = \alpha |\tilde{\Psi}_R(\Gamma_1); \sigma\rangle + \beta |S_R; \sigma\rangle,$$

где $\beta \approx (1 + 4/3 (\varepsilon_P / t_{sp}))^{-1/2}$ и $\alpha = i\sqrt{1 - \beta^2}$.

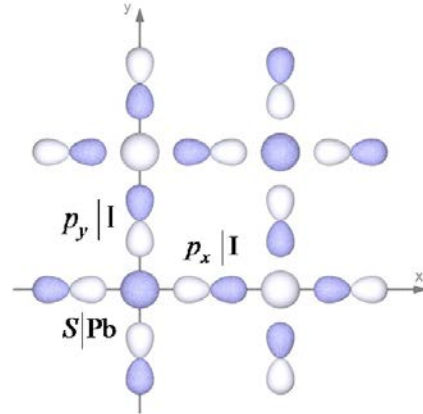


Рис. 7. Волновая функция в максимуме валентной зоны (в сечении XY-плоскостью)

Было обнаружено, что характерные для локальной электронной структуры сдвиги электронных уровней, вызванные тетрагональными искажениями, заведомо меньше 0.1 эВ. Следует отметить, что понижение симметрии $O_h \rightarrow C_{4h}$ приводит к небольшому, < 0.1 эВ, расщеплению квартетных уровней, Γ_8^+ и Γ_8^- , каждого на пару дублетных уров-

ней. При этом крамерсовские дублеты, Γ_6^+ и Γ_6^- , сохраняют свою идентичность.

Общие выводы и перспективы применения модели. Оптическое поглощение в галогенидных перовскитах

Выше нами установлены, во-первых, зависимости ветвей зонного спектра от фундаментальных параметров электронной структуры (ϵ , t и λ), и, во-вторых, конкретные формы электронных волновых функций у краев валентной зоны и зоны проводимости. Подчеркнем, что полученные результаты имеют универсальный характер и применимы для широкого семейства галогенидных перовскитов ABX_3 ($A = \text{Cs}, \text{NH}_4, \text{CH}_3\text{NH}_3$;

$B = \text{Sn}, \text{Pb}$; $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$). Конкретная реализация модели для отдельных представителей семейства предполагает лишь количественные различия параметров (ϵ , t и λ). Такой подход позволит на следующем этапе нашего исследования осуществить сравнительный анализ физических свойств указанного семейства перовскитов. В этом плане важнейшей задачей является расчёт оптического поглощения. Ниже коротко приведены основные пункты такого расчёта.

Коэффициент оптического поглощения $\alpha(\omega)$ при переходах электрона между различными состояниями валентной (v) зоны и зоны проводимости (c) выражается следующим образом

$$\alpha(\omega) = (2\pi e/m_0 c)^2 c/n\omega \sum_{v,c} \sum_{\vec{q}} \left| \langle \Psi_q^{(v)} | \vec{\epsilon} \vec{p} | \Psi_q^{(c)} \rangle \right|^2 \delta(E_c(q) - E_v(q) - \hbar\omega), \quad (4)$$

где v и c — комбинированные индексы из квантовых чисел, например сорта представления и номера его базисной орбитали, нумерующих ветви зонного спектра; $\vec{\epsilon}$ — вектор поляризации; \vec{p} — оператор импульса.

В частности, при фундаментальном поглощении вблизи краев зон получаем для матричного элемента

$$\langle \Psi_q^{(v)} | \vec{\epsilon} \vec{p} | \Psi_q^{(c)} \rangle \approx \langle \Psi_R(\Gamma_1); \sigma | \vec{\epsilon} \vec{p} | P_R(1/2, j) \rangle, \quad (5)$$

и суммирование по v, c в выражении (4) означает суммирование по $\sigma = \uparrow, \downarrow$ и $j = \pm 1/2$.

Оценка матричного элемента дипольного перехода при стандартной аппроксимации (5) позволяет свести описание $\alpha(\omega)$ у края фундаментального поглощения к расчёту комбинированной плотности состояний $J_{vc}(\omega)$, так что

$$\alpha(\omega) \sim J_{vc}(\omega) \sum_{\sigma} \sum_j \left| \langle \Psi_R(\Gamma_1); \sigma | \vec{\epsilon} \vec{p} | P_R(1/2, j) \rangle \right|^2.$$

Отметим также, что развитый здесь подход будет также обобщен и применен к

анализу электронных состояний и оптического поглощения в широкой области \vec{q} -пространства за пределами R точки зоны Бриллюэна.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта №14-43-03544.

Библиографический список

1. Харрисон, У. Электронная структура твердых тел / У. Харрисон. — Москва : Мир, 1983.
2. Borriello I., Cantele G., Ninno D. // Phys. Rev. B 77. — 2008. — P. 235214.
3. Brivio F., Butler K.T., Walsh A. // Phys. Rev. B 89. — 2004. — P. 155204.
4. Brivio F., Walker A.B., Walsh A. // APL Mater. — 2013. — № 1. — P. 042111.
5. Even J., Pedesseau L., Jancu J.-M., Katan C. J. // Phys. Chem. Lett. — 2013. — № 4. — P. 2999.
6. Giorgi G., Fujisawa J.-I., Segawa H., Yamashita K. J. // Phys. Chem. Lett. — 2013. — № 4. — P. 4213.

*Поступила в редакцию
25.03.2016*

В. С. Дацко

Об уравнении эволюции систем

Продемонстрировано, что описание системы – линейного осциллятора в режиме свободных колебаний – в настоящее время внутренне противоречиво. Использование уравнения движения системы в представлении Лагранжа позволяет определить размерность этой системы, как равную трём. Это ведёт к изменению фазового портрета системы. Показано, что $D \neq \text{const}$ и $\text{div}(\dot{x}) \neq 0$.

Ключевые слова: фазовый объём, теорема Лиувилля, осциллятор, уравнение движения, представление Лагранжа.

Об авторах

Дацко Виктор Сергеевич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и естественных наук филиала «Протвино» Государственного университета «Дубна».

Уравнение $\frac{dD}{dt} = D \cdot \sum_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} = D \text{div}(\dot{x})$ применяется во многих разделах физики (см., например, [4]). Здесь D — детерминант якобиана перехода от одного состояния системы к другому, а \dot{x} — «фазовый поток». В приложении I, представляющего собой цитату из учебника И.И. Ольховского, показано как именно используется детерминант для перехода от системы к системе. Однако применение уравнения недостаточно широко. Ограниченность его применения связана с недоразумением в виде вывода о том, что для гамильтоновых систем оно вырождается в утверждение $\text{div}(\dot{x})=0$ и как следствие $D=\text{const}$ («теорема Лиувилля», далее ТЛ). Таким образом, оно тривиально, а потому, несколько упрощая рассуждения, его применение не может привести к каким-либо новым результатам.

На самом деле вывод, что для гамильтоновых систем $D=\text{const}$, ошибочен, что подтверждается и экспериментально, и теоретически.

Из ТЛ следует обратная теорема Пуанкаре, в соответствии с которой капля чернил, растворившихся в воде непременно должна снова собраться в каплю! Миллиарды наблюдений за многие столетия опровергают этот вывод.

В статистической физике введена характеристика системы — энтропия. Она определяется как $S=k \ln P$, где S — энтропия; k — константа; P — вероятность. $P=\int f(x) dx$

или $dP=f(x)dx$, где $f(x)$ — функция плотности распределения; dx — интервал области системы, вероятность попасть в который равна dP , т.е. dx — дифференциально малая область фазового объёма системы. Величины S и x связаны прямо пропорциональной зависимостью, однако S может только возрастать, а x — (в соответствии с ТЛ) только сохраняться...

В [2] показано, что в действительности в противоречии с ТЛ, для широко используемой системы — линейного осциллятора, $D \neq \text{const}$.

Это означает, что выражение $\dot{D}=D \text{div}(\dot{x})$ вовсе не является тривиальным и, как показано в [2], может использоваться как фундаментальный закон, подтверждая несостоятельность ТЛ. Для этого достаточно показать, что хоть одна система противоречит этой «теореме». В качестве таковой выбрана широко распространённая модельная система — линейный осциллятор в режиме свободных колебаний (далее — осциллятор). Эта система как наиболее простая традиционно используется для доказательства истинности ТЛ, основывающегося на вычислении дивергенции фазового потока осциллятора $(\sum_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i})$, которая, якобы, равна нулю, а поэтому $dD/dt = D \cdot \sum_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} = 0$, откуда следует, что $D = \text{const}$, и, следовательно, фазовый объём системы сохраняется. В работе [5] приведено простое доказательство, подразумевающее, что размерность системы равна 2.

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i} = \left(\frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{p}}{\partial p} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial p} - \frac{\partial}{\partial p} \frac{\partial H}{\partial x} \right) \equiv 0.$$

Вычисления выполняются с использованием уравнений Гамильтона $\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial t}$, $\frac{\partial H}{\partial p} = \frac{\partial x}{\partial t}$, т.е. молчаливо предполагается, что число фазовых переменных для данной системы равно двум (обобщенные переменные x и p ; заметим, осциллятор линейный (т.е. одномерный! — подробнее см. [2])).

Внимательное изучение вычислений и их результатов позволяют усомниться в справедливости традиционных выводов.

Определив систему как совокупность объектов и связей между ними, выделенных из среды на определённое время и с определённой целью, следует считать осциллятор системой с соответствующим фазовым пространством.

Обычно (например, в механике) фазовым пространством называется воображаемое пространство, в частном случае координатными осями которого являются обобщённые координаты q и обобщённые импульсы p . Разумеется, именно такое задание координат необязательно. Оно определяется исследователем и преследует цели наилучшего описания системы. Например, для описания состояния моля идеального газа обычно используют фазовое пространство с координатами P, V, T (P — давление, V — объём, T — температура).

Состояние системы в данный момент времени изображается в фазовом пространстве фазовой точкой (а для непрерывных величин — бесконечно малой окрестностью точки).

Совокупность точек может образовывать фазовую траекторию. Совокупность фазовых точек или траекторий составляет фазовое пространство системы.

Изменение состояния системы (изменение фаз системы, т.е. фазовых координат системы, а значит, фазовых точек — откуда, собственно, термин — фазовое пространство), например в механике, связано с некоторыми уравнениями движения, т.е. задана определённая функциональная зависимость между координатами.

Так, для осциллятора в режиме свободных колебаний уравнение движения можно записать в виде:

$$F = -kx \quad \Rightarrow \quad d^2x/dt^2 + \omega_0^2x = 0.$$

Его решение:

$$x = x_0 \cos \omega_0 t + (v_0/\omega_0) \sin \omega_0 t \rightarrow \\ \rightarrow x = c \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Не вызывает сомнения, запись этого же решения в общем виде как:

$$x = x(x_0, v_0, t),$$

что является формально точной записью уравнения движения системы в представлении Лагранжа (см. [3]), а фазовую траекторию (фазовый портрет) обычно (в действительности фазовая траектория другая) обычно получают в виде (см. [1; 2]):

$$x^2 + v^2/\omega_0^2 = c^2,$$

т.е. в виде эллипса, идентичного приведённому на рис. 1.

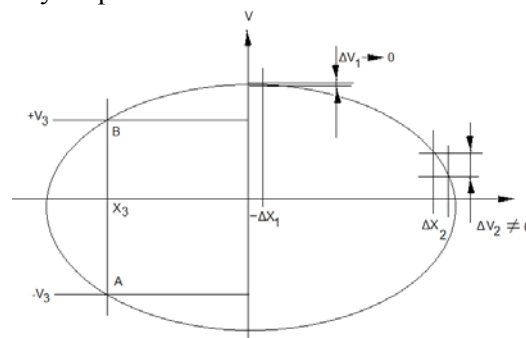


Рис. 1. Традиционный фазовый портрет осциллятора: строчной буквой v обозначена одна из фазовых переменных системы, в отличие от прописной буквы V , которой обозначается фазовый объём

Действительно, поскольку

$$v = v_0 \cos \omega_0 t - x_0 \omega_0 \sin \omega_0 t \rightarrow \\ \rightarrow x = c \cdot \omega_0 \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

то после несложных преобразований получаем уравнение эллипса.

Сечению фазового портрета (очевидно, что фазовое пространство предполагается двумерным с переменными x и v) прямой, проходящей через точку $-x_3$ фазовой переменной x , соответствуют две точки сопряжённой координаты v : A и B , с координатами по оси ординат $-v_3$ и $+v_3$. Таким образом, из всей фазовой плоскости данной координате x_3 соответствуют только две точки, остальные точки не принадлежат фазовому портрету, т.к. не удовлетворяют уравнению эллипса. Следовательно, фазовым портретом осциллятора является замкнутая кривая — эллипс, а фазовым объёмом системы является длина этой кривой.

Одному и тому же интервалу Δx на разных участках оси абсцисс соответствуют отличающиеся по длине интервалы по оси ординат.

На рис. 1 $\Delta x_1 = \Delta x_2$ по построению, однако очевидно, что $\Delta v_1 \neq \Delta v_2$! Следовательно, $\Delta V_1 = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta v_1^2} \cong \Delta x_1$, а $\Delta V_2 = \sqrt{\Delta x_2^2 + \Delta v_2^2}$ и ΔV_2 отчётливо превышает ΔV_1 (более, чем в 2 раза!). И это полностью противоречит выводу о сохранении фазового объёма данной системы (даже в течение одного периода). Таким образом, традиционная модель эволюции осциллятора внутренне противоречива, при движении по эллипсу фазовый объём, соответствующий разным состояниям системы, меняется, в отличие от распространённого мнения.

Как следует из приведённого выше общего вида уравнения движения системы в представлении Лагранжа (см. также [2]), размерность системы равна 3, следовательно, представление $div(\dot{x})$ в виде суммы состоит из трёх слагаемых, и фазовое пространство представляет собой трёхмерную фигуру. Проекция её на плоскость OXV — эллипс (см. рис. 1), а по оси аппликат координата (время) определяется периодом колебаний осциллятора. То есть, когда точка на плоскости OXV проходит путь равный длине эллипса ℓ , проходит время равное периоду колебаний осциллятора T . Учитывая, что в режиме свободных колебаний частота осциллятора не меняется ($\omega_0 = \text{const}$), траектория движения точки представляет собой пространственную винтовую линию, обвивающую воображаемый прямой эллиптический цилиндр. Следовательно, развёртка фазовой траектории (рис. 2) представляет собой прямую линию, которая наклонена к горизонтальной оси под постоянным углом α .

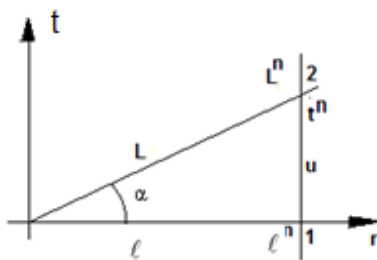


Рис. 2. Развёртка эллиптической спирали:

r – ось расстояний (длин эллипса) в развёртке; t – ось аппликат (время) в развёртке; L – развёртка винтовой линии, путь проходимый точкой по спирали; ℓ – развёртка эллипса; α – угол между

винтовой линией и плоскостью OXV (эллипсом); t_n – длина перпендикуляра u между точками $L^n(x_n, v_n, t_n)$ и $\ell^n(x_n, v_n)$

Перпендикуляр u к оси r пересечёт наклонную прямую, образуя прямоугольный треугольник, из которого можно найти длину перпендикуляра u до точки пересечения:

$$u^2 = L^2 - \ell^2.$$

Поскольку $\alpha = \text{const}$, то соотношение $u^2 = L^2 - \ell^2$ выполняется для любого произвольного положения точки на пространственной кривой, т.е. для произвольного момента времени. Соответственно, для дифференциалов:

$$du^2 = \underbrace{(dx^2 + dv^2 + dt^2)}_{dL} - \underbrace{(dx^2 + dv^2)}_{d\ell}.$$

Таким образом, для пространственной винтовой линии, обвивающей воображаемый прямой эллиптический цилиндр, шаг между витками равен периоду движения точки по эллипсу, а учитывая, что $\alpha = \text{const}$, для произвольной точки:

$$dt = \text{tga} \cdot \sqrt{dx^2 + dv^2}.$$

Фазовые портреты осцилляторов во всех режимах отличаются от общепринятых и соответствуют друг другу больше, чем принято традиционно. Обычно считается, что фазовый портрет линейного осциллятора в режиме свободных колебаний, плоская кривая — эллипс (приведён на рис. 1, 3а), замкнутая кривая (подробнее см. [1]). Фазовые портреты осцилляторов в режиме затухающих колебаний и в режиме вынужденных колебаний — кривые незамкнутые — логарифмические спирали: соответственно — сходящаяся и расходящаяся (подробнее можно посмотреть, например, в [1 и 2]). В приложении 2 приведены вычисления для получения аналитического вида детерминанта. Очевидно, что он представляет собой функцию, а не константу.

Учтя трёхмерность осциллятора, как это сделано в настоящей статье, фазовые портреты следует изображать иначе (рис. 3б).

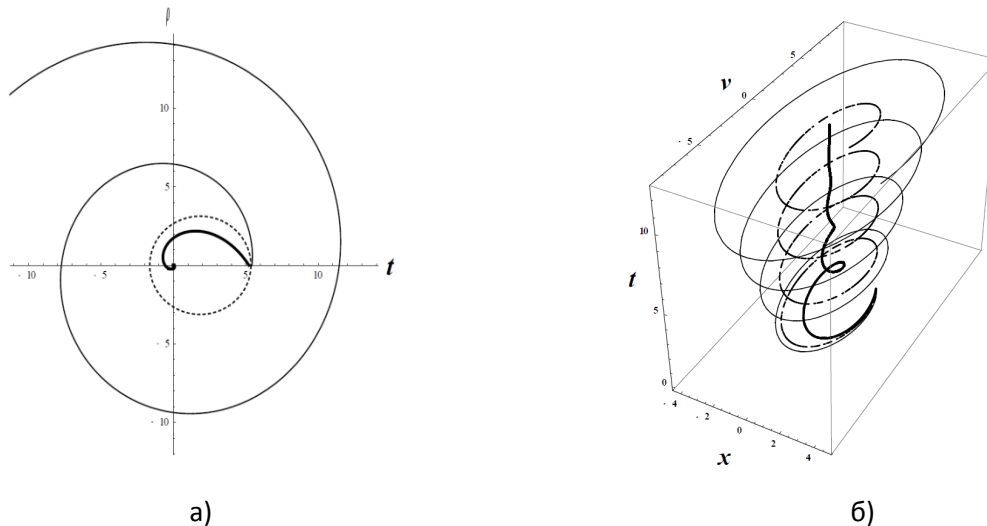


Рис. 3.

- а) Фазовые портреты осцилляторов как двумерные системы. Штрихованная кривая — осциллятор в режиме свободных колебаний (осциллятор 1); жирная кривая — осциллятор в режиме затухающих колебаний (осциллятор 2); тонкая кривая — осциллятор в режиме вынужденных колебаний (осциллятор 3);
 б) Фазовые портреты осцилляторов как трёхмерные системы. Штрихованная кривая — осциллятор 1; жирная кривая — осциллятор 2; тонкая кривая — осциллятор 3

Как показывает рис. 3б, все три фазовых портрета осцилляторов — пространственные спирали: 1) осциллятор 1 — прямая эллиптическая спираль, 2) осциллятор 2 — суживающаяся спираль, 3) осциллятор 3 — расширяющаяся спираль.

Приведённый анализ работы осциллятора, показывает, что нет никаких оснований утверждать сохранение фазового объёма осциллятора, поскольку для любого режима его работы $D(t) \neq \text{const}$, что показывают рис. 1 и 3, а значит, и $dD(t)/dt \neq 0$, и, следовательно, в любом режиме работы осциллятор не сохраняет фазовый объём.

Считаю приятным долгом поблагодарить В.И. Белоусова за помощь в работе с программой "Mathematica".

Библиографический список

1. Андронов, А. А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. — Москва : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959.
2. Дацко, В. С. Фазовый объём / В.С. Дацко. — Москва : Лица, 2011.
3. Кочин, Н. Е. Теоретическая гидромеханика. Ч.1 / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. — Москва : Физматгиз, 1963.
4. Леонтович, М. А. Введение в термодинамику. Статистическая физика / М.А. Леонтович. — Москва : Наука, 1983.

5. Терлецкий, Я. П. Статистическая физика / Я.П. Терлецкий. — Москва : Высш. шк., 1973.

Приложение 1

Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков. — М.: Наука, 1970, с. 376.

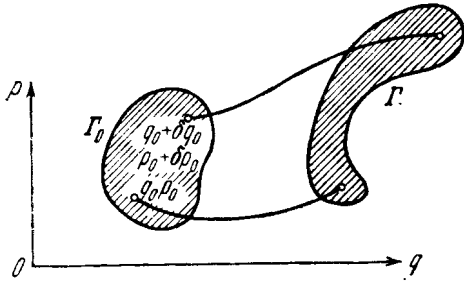
Рассмотрим бесконечную совокупность одинаковых механических систем, отличающихся друг от друга только начальными условиями. Иначе говоря, рассмотрим бесконечное множество точных копий данной реальной системы (для всех этих систем задан одинаковый гамильтониан, одни и те же диссипативные силы, но начальные условия этих систем различны). Такая виртуальная совокупность систем называется ансамблем Гиббса. Пусть в произвольный момент времени t_0 ансамбль заполняет область (Γ_0) фазового пространства, причём фазовый объём этой области равен

$$\Gamma_0 = \int \dots (\Gamma_0) \dots \int \delta q_{10} \dots \delta q_{s0} \delta p_{10} \dots \delta p_{s0}. \quad (43.2)$$

В момент времени $t = t_0 + \Delta t$ ансамбль займёт другую область (Γ) с фазовым объёмом

$$\Gamma = \int \dots (\Gamma) \dots \int \delta q_1 \dots \delta q_s \delta p_1 \dots \delta p_s. \quad (43.3)$$

(см. рисунок, на котором изображено перемещение некоторого ансамбля систем в двумерном фазовом пространстве).



Найдём соотношение между величинами Γ и Γ_0 или закон изменения фазового объёма ансамбля Гиббса. Учитывая, что действительное перемещение каждой системы ансамбля подчинено уравнениям движения, а следовательно, переменные q, p в момент времени t являются функциями этих же переменных, взятых в начальный момент времени, запишем фазовый объём Γ в виде интеграла по области (Γ_0) :

$$\Gamma = \int \dots_{(\Gamma_0)} \dots \int D \delta q_{10} \dots \delta q_{s0} \delta p_{10} \dots \delta p_{s0}, \quad (43.4)$$

где $D = \frac{\partial(q,p)}{\partial(q_0,p_0)}$ — якобиан преобразования переменных q, p к значениям этих переменных q_0, p_0 в момент времени t_0 , а функции

$$q = q(q_0, p_0, t), \quad p = p(q_0, p_0, t)$$

являются решениями уравнений движения.

Из сопоставления (43.4) и (43.2) видно, что задача об отыскании закона изменения Γ сводится к отысканию закона изменения якобиана D

Приложение 2

Вид детерминанта для линейного осциллятора. Доказательство $D \neq \text{const}$

Дифференцируя выражения (43.2) и (43.3) из приложения 1, можно получить:

$$d\Gamma_0 = dV_0 \text{ и } d\Gamma = dV,$$

где $dV_0 = \delta q_{10} \dots \delta q_{s0} \delta p_{10} \dots \delta p_{s0}$, а $dV = \delta q_1 \dots \delta q_s \delta p_1 \dots \delta p_s$. Очевидно, что $d\Gamma_0$ и $d\Gamma$ — фазовые объёмы соответствующих систем. Дифференцируя выражение (43.4), можно получить:

$$d\Gamma = D dV_0 \text{ или } dV = D dV_0,$$

т.е. $D = \frac{\partial(q,p)}{\partial(q_0,p_0)} = \frac{dV}{dV_0}$ — одна из форм представления детерминанта перехода.

Пусть задана некая динамическая система, чей явный вид неизвестен, подчиняющаяся для простоты уравнению движения в представлении Лагранжа с тремя переменными в форме:

$$x = x(x_0, v_0, t),$$

x — пространственная координата; v — скорость; t — время.

Поскольку переход от dV_0 к dV , т.е. от «старой» системы к «новой» осуществляется с помощью детерминанта D , а функциональная связь известна, то вид D устанавливается легко:

$$\begin{cases} x_n = x_n(x_0, v_0, t) \\ v_n = v_n(x_0, v_0, t) \\ t_n = t_n(x_0, v_0, t) \end{cases}$$

Отсюда следует, вводя обозначения «старой» системы буквой s ,

$$\begin{cases} dx_n = \frac{\partial x_n}{\partial x_s} dx_s + \frac{\partial x_n}{\partial v_s} dx_s + \frac{\partial x_n}{\partial t_s} dt_s \\ dv_n = \frac{\partial v_n}{\partial x_s} dx_s + \frac{\partial v_n}{\partial v_s} dx_s + \frac{\partial v_n}{\partial t_s} dt_s \rightarrow \\ dt_n = \frac{\partial t_n}{\partial x_s} dx_s + \frac{\partial t_n}{\partial v_s} dx_s + \frac{\partial t_n}{\partial t_s} dt_s \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{vmatrix} dx_n \\ dv_n \\ dt_n \end{vmatrix} = D \begin{vmatrix} dx_s \\ dv_s \\ dt_s \end{vmatrix},$$

где

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_n}{\partial x_s} & \frac{\partial x_n}{\partial v_s} & \frac{\partial x_n}{\partial t_s} \\ \frac{\partial v_n}{\partial x_s} & \frac{\partial v_n}{\partial v_s} & \frac{\partial v_n}{\partial t_s} \\ \frac{\partial t_n}{\partial x_s} & \frac{\partial t_n}{\partial v_s} & \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \end{vmatrix}$$

Пусть для исследуемой системы известен гамильтониан H и справедливы уравнения Гамильтона, $\frac{\partial H}{\partial x} = -\dot{p}$, $\frac{\partial H}{\partial p} = \dot{x}$ — x и p —

обобщённые переменные. $\frac{\partial H}{\partial x_s} = \frac{\partial x_n}{\partial x_s}$, по-

скольку гамильтониан один и тот же и в «старой» системе, и в «новой». С другой стороны,

$$\frac{\partial H}{\partial x_s} = \frac{-\dot{p}_s}{-p_n} = \frac{\dot{p}_s}{p_n}, \text{ ПОЭТОМУ } \frac{\partial x_n}{\partial x_s} = \frac{\dot{p}_s}{p_n} = \frac{\dot{v}_s}{v_n}.$$

$$\frac{\frac{\partial H}{\partial p_s}}{\frac{\partial H}{\partial x_n}} = \frac{\partial x_n}{\partial p_s} = \frac{\partial x_n}{m \partial v_s} = \frac{v_s}{-p_n} \rightarrow \frac{\partial x_n}{\partial v_s} = -\frac{p_s}{p_n} = -\frac{v_s}{\dot{v}_n}, \frac{\partial x_n}{\partial t_s} = \frac{\partial x_n}{\partial t_n} \frac{\partial t_n}{\partial t_s} = v_n \frac{\partial t_n}{\partial t_s}.$$

$$\frac{\frac{\partial H}{\partial x_s}}{\frac{\partial H}{\partial p_n}} = \frac{\partial p_n}{\partial x_s} = \frac{-\dot{p}_s}{v_n} \rightarrow \frac{\partial v_n}{\partial x_s} = -\frac{\dot{v}_s}{v_n}, \frac{\partial v_n}{\partial v_s} = \frac{\partial}{\partial v_s} \frac{\partial H}{\partial p_n} = \frac{m \partial^2 H}{\partial p_s \partial p_n},$$

$$\frac{\partial v_n}{\partial t_s} = \frac{\partial v_n}{\partial t_n} \frac{\partial t_n}{\partial t_s} = \frac{\partial p_n}{m \partial t_n} \frac{\partial t_n}{\partial t_s}$$

$$\frac{\partial t_n}{\partial x_s} = \frac{\partial t_n}{\partial v_n} \frac{\partial v_n}{\partial x_s} = \frac{\partial t_n}{\partial v_n} \left(-\frac{\dot{v}_s}{v_n}\right), \frac{\partial t_n}{\partial v_s} = \frac{\partial t_n}{\partial x_n} \frac{\partial x_n}{\partial v_s} = \frac{\partial t_n}{\partial v_n} \left(-\frac{v_s}{\dot{v}_n}\right)$$

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_n}{\partial x_s} & \frac{\partial x_n}{\partial v_s} & \frac{\partial x_n}{\partial t_s} \\ \frac{\partial v_n}{\partial x_s} & \frac{\partial v_n}{\partial v_s} & \frac{\partial v_n}{\partial t_s} \\ \frac{\partial t_n}{\partial x_s} & \frac{\partial t_n}{\partial v_s} & \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\dot{v}_s}{v_n} & -\frac{v_s}{\dot{v}_n} & v_n \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \\ -\frac{\dot{v}_s}{v_n} & \frac{m \partial^2 H}{\partial p_s \partial p_n} & \frac{\partial v_n}{\partial t_n} \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \\ -\frac{\partial t_n}{\partial v_n} \left(\frac{\dot{v}_s}{v_n}\right) & -\frac{\partial t_n}{\partial v_n} \left(\frac{v_s}{\dot{v}_n}\right) & \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \end{vmatrix}$$

$$D = \left(\frac{\partial t_n}{\partial t_s}\right)^2 \cdot \begin{vmatrix} \frac{\dot{v}_s}{v_n} & -\frac{v_s}{\dot{v}_n} & v_n \\ -\frac{\dot{v}_s}{v_n} & \frac{m \partial^2 H}{\partial p_s \partial p_n} & \frac{\partial v_n}{\partial t_n} \\ -\frac{\partial t_n}{\partial v_n} \left(\frac{\dot{v}_s}{v_n}\right) & -\frac{\partial t_n}{\partial v_n} \left(\frac{v_s}{\dot{v}_n}\right) & \frac{\partial v_n}{\partial t_n} \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial t_n}{\partial t_s}\right)^2 \cdot \left(\frac{\dot{v}_s}{v_n}\right) \cdot \left(\frac{v_s}{\dot{v}_n}\right) \cdot \begin{vmatrix} v_n & -1 & v_n \\ \frac{\dot{v}_s}{v_n} & \frac{m \partial^2 H}{\partial p_s \partial p_n} \cdot \frac{\dot{v}_n}{v_s} & \frac{\partial v_n}{\partial t_n} \\ -1 & -1 & \frac{\partial v_n}{\partial t_n} \end{vmatrix}$$

Если явный вид уравнений движения известен, то и D можно представить в более удобном виде.

Пусть исследуемая система — линейный осциллятор в режиме свободных колебаний.

Решение уравнения движения линейного осциллятора записывается как:

$$x = x_0 \cos \omega_0 t + (v_0/\omega_0) \sin \omega_0 t.$$

Выражения для x и v имеют вид:

$$x = x_s \cos \omega_0 t + (v_s/\omega_0) \sin \omega_0 t,$$

$$v = v_s \cos \omega_0 t - x_s \omega_0 \sin \omega_0 t.$$

Учитывая, что t — обратная функция к x (t_n — обратная функция к x_n), можно записать:

$$\partial x / \partial t = v,$$

$$\partial^2 x / \partial t^2 = -\omega_0^2 x, \text{ (из уравнения осциллятора)}$$

$$\frac{\partial t_n}{\partial x_s} = \left(\frac{\partial t_n}{\partial x_n}\right) \cdot \left(\frac{\partial x_n}{\partial x_s}\right) = \left(\frac{\partial x_n}{\partial x_s}\right) / \left(\frac{\partial x_n}{\partial t_n}\right) = \left(\frac{\partial x_n}{\partial x_s}\right) / v_n = \cos \omega_0 t / v_n,$$

$$\frac{\partial t_n}{\partial v_s} = \left(\frac{\partial t_n}{\partial v_n}\right) \cdot \left(\frac{\partial v_n}{\partial v_s}\right) = \left(\frac{\partial v_n}{\partial v_s}\right) / \left(\frac{\partial v_n}{\partial t_n}\right) = \left(\frac{\partial v_n}{\partial v_s}\right) / (-\omega_0^2 x_n) = \cos \omega_0 t / (-\omega_0^2 x_n).$$

Тогда детерминант для осциллятора приобретёт вид:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_n}{\partial x_s} & \frac{\partial x_n}{\partial v_s} & \frac{\partial x_n}{\partial t_s} \\ \frac{\partial v_n}{\partial x_s} & \frac{\partial v_n}{\partial v_s} & \frac{\partial v_n}{\partial t_s} \\ \frac{\partial t_n}{\partial x_s} & \frac{\partial t_n}{\partial v_s} & \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \omega_0 t & \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} & v_n \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \\ -\omega_0 \sin \omega_0 t & \cos \omega_0 t & -\omega_0^2 x_0 \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \\ \frac{\cos \omega_0 t}{v_n} & \frac{\cos \omega_0 t}{-\omega_0^2 x_0} & \frac{\partial t_n}{\partial t_s} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} \cos \omega_0 t & \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} & v_n d_{33} \\ -\omega_0 \sin \omega_0 t & \cos \omega_0 t & -\omega_0^2 x_0 d_{33} \\ \frac{\cos \omega_0 t}{v_n} & \frac{\cos \omega_0 t}{-\omega_0^2 x_0} & d_{33} \end{vmatrix} = d_{33} \cdot \begin{vmatrix} \cos \omega_0 t & \frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} & v_n \\ -\omega_0 \sin \omega_0 t & \cos \omega_0 t & -\omega_0^2 x_0 \\ \frac{\cos \omega_0 t}{v_n} & \frac{\cos \omega_0 t}{-\omega_0^2 x_0} & 1 \end{vmatrix}$$

$d_{33} = \frac{\partial t_n}{\partial t_s}$ определить несложно.

Как уже было показано, $dt = \operatorname{tga} \cdot \sqrt{dx^2 + dv^2}$. Отсюда легко получить:

$$d_{33} = \frac{dt_n}{dt_s} = \frac{\sqrt{dx_n^2 + dv_n^2}}{\sqrt{dx_s^2 + dv_s^2}}$$

Используя алгебраические дополнения, можно получить:

$$D = \det J = d_{33} + \sin(\omega_0 t) \cdot \cos(\omega_0 t) \times \\ \times \left(\frac{v_n}{\omega_0 x_n} - \frac{\omega_0 x_n}{v_n} \right) - 2 \cos^2 \omega_0 t.$$

Видно, что даже если в выражении для детерминанта положить d_{33} равным нулю, то

детерминант всё равно будет отличен от нуля (и от константы). Допустимо даже более жёсткое заключение (и более точное), каким бы ни был элемент d_{33} , детерминант всё равно будет не константой, а функцией и он не равен тождественно нулю. Таким образом, факт $D \neq \text{const}$ для линейного осциллятора в режиме свободных колебаний можно считать доказанным.

Поступила в редакцию
25.03.2016

УДК 681.5

А. П. Леонов**Об анализе цифровых прецизионных позиционных САУ**

Предлагается упрощенная методика расчета параметров цифровой прецизионной позиционной системы с широтно-импульсным управлением. Анализируются условия, при которых данная цифровая система управления в первом приближении может рассчитываться как непрерывная. Приводимые теоретические выводы иллюстрируются примером анализа конкретной прецизионной позиционной цифровой системы управления.

Ключевые слова: цифровая прецизионная позиционная система автоматического управления, точность позиционирования, качество переходного процесса, цифровое измерение скорости, частотный критерий Найквиста для логарифмических характеристик.

Об авторах

Леонов Анатолий Петрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, зам. директора филиала «Протвино» Государственного университета «Дубна» по учебной и научной работе.

При автоматизации технологических процессов и производств актуальной является задача разработки методики анализа цифровых САУ, позволяющей рассчитывать параметры, обеспечивающие заданное качество управления. Как правило, расчет нелинейных цифровых систем управления осуществляется численными методами с использованием малых приращений и сшивания (припасовывания) решений. Корректность решений в этом случае определяется адекватностью математической модели и реальной цифровой САУ. В общем случае построение «адекватной» математической модели цифровой САУ представляет собой сложную задачу, требует значительного времени и высокой квалификации ее разработчика [3].

Однако для определенных классов цифровых САУ представляется возможной разработка упрощенной методики их анализа. Рассмотрим цифровую прецизионную позиционную систему с широтно-импульсным управлением (ЦППСУ).

ЦППСУ — нелинейная система, обеспечивающая перемещение объекта управления в заданную координату с высокой точностью (единицы — десятки мкм) при заданном качестве регулирования (заданы: перерегулирование, время переходного процесса, точность и т.д.).

Цель работы — предложить упрощен-

ную методику расчета параметров ЦППСУ с широтно-импульсным управлением.

Анализ функциональной схемы ЦППСУ

При проектировании ЦППСУ придется решать две противоречивые задачи: обеспечение заданной точности позиционирования объекта управления (ОУ) в заданную координату и получение требуемого качества переходного процесса, включая обеспечение максимального быстродействия САУ [8]. Как известно [3; 11], установившаяся ошибка в САУ определяется значением коэффициента усиления: чем меньше заданная величина ошибки, тем больше требуемое значение коэффициента усиления. В результате ЦППСУ может оказаться либо неустойчивой, либо качество переходного процесса не будет удовлетворять заданным требованиям. Для обеспечения требуемого качества управления при заданном коэффициенте усиления в структурную схему ЦППСУ вводят местную обратную связь по скорости [2; 10].

Типовая функциональная схема двухконтурной ЦППСУ представлена на рис. 1. На один вход (+) цифровой схемы сравнения ЦСС1 подается код $N_{ВХ}$, соответствующий заданной длине перемещения ОУ, на другой вход (–) — код $N_{Р\ Вых}$, соответствующий его реальной длине перемещения $S_{Вых}$. Реальная величина перемещения $S_{Вых}$ измеряется цифровым датчиком перемещения ЦДП относительного типа (оптической линейкой), который непосредственно измеряет переме-

шение ОУ, а не угол поворота вала двигателя. При этом исключаются погрешности в кинематической цепи между валом двигателя и нагрузкой, что повышает точность и быстродействие системы управления движением ОУ [2]. Код $N_{P\text{ВЫХ}}$ с выхода сумматора $\sum N_{\text{ВЫХ}}$ представляет собой алгебраическую сумму импульсов $N_{\text{ВЫХ}}$. Единица отсчета ЦДП ($\delta_{\text{ДАТ}}$) измеряется в метрах на импульс (м/имп), а его коэффициент передачи

$$K_{\text{ДАТ}}[\text{имп/м}] = 1/\delta_{\text{ДАТ}}.$$

Цифровой датчик скорости ЦДС реализован на реверсивном счетчике, который подсчитывает число импульсов $N_{\text{ВЫХ}}$ за строго фиксированный интервал времени $T_{\text{СК}}$, в конце которого в счетчике записан некоторый код $N_{\text{СК}}$, пропорциональный скорости ОУ [2]. В конце каждого интервала времени $T_{\text{СК}}$ счетчик сбрасывается, и его режим работы повторяется. Коэффициент передачи ЦДС определяется отношением

$$K_{\text{ОС}} = N_{\text{СК}}/V,$$

где V — реальная скорость ОУ в м/с.

Значение $N_{\text{СК}}$ определяется из выражения

$$N_{\text{СК}} = VK_{\text{ДАТ}}T_{\text{СК}}.$$

Тогда окончательное выражение для определения коэффициента передачи ЦДС

$$K_{\text{ОС}} = K_{\text{ДАТ}}K_{\text{СК}}T[\text{имп} \cdot \text{с/м}].$$

Из этого выражения следует, что при заданном ЦДП (заданном $K_{\text{ДАТ}}$) изменение коэффициента передачи скоростной обратной связи можно осуществлять изменением времени $T_{\text{СК}}$, в течение которого происходит запись импульсов в реверсивный счетчик ЦДС.

На выходе ЦСС1 присутствует ошибка по положению ε_1 , а на выходе цифровой схемы сравнения ЦСС2 — сигнал ошибки

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 - K_{\text{ОС}} \cdot V.$$

В зависимости от величины ε_2 на выходе преобразователя «код — ширина импульса» (КШИ) формируются импульсы определенной длительности $t_{\text{ИМП}}$ и постоянной амплитуды, следующие с постоянным периодом $T_{\text{УПР}}$ (широтно-импульсное управление [3; 12]). Управляющие импульсы $t_{\text{ИМП}}$ поступают на вход мостового транзисторного каскада (МТК) [6; 7], являющегося реверсивным усилителем мощности. С выхода МТК среднее значение управляющего напряжения $U_{\text{Я}}$ поступает на обмотку якоря исполнительного двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ИД). Его величина

$$U_{\text{Я}} = U_{\text{ПИТ}} \cdot t_{\text{ИМП}}/T_{\text{УПР}},$$

где $U_{\text{ПИТ}}$ [В] — напряжение источника питания.

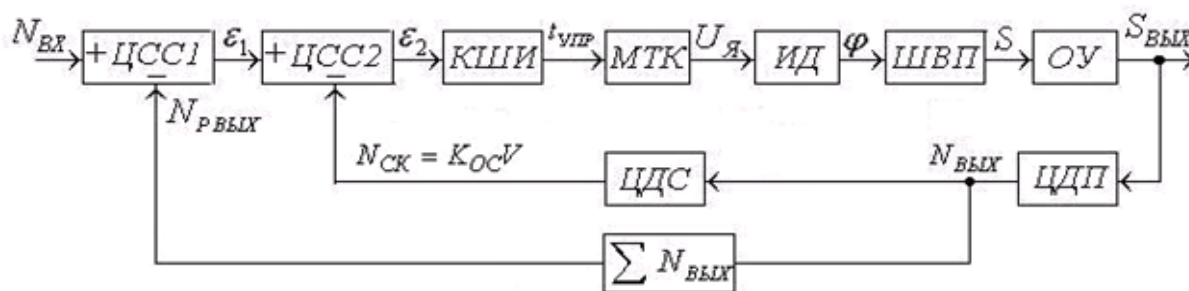


Рис. 1. Функциональная схема двухконтурной ЦППСУ

Угол φ поворота вала двигателя преобразуется в поступательное движение ОУ с помощью шарико-винтовой передачи ШВП. Линейное перемещение ОУ

$$S_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{ШВП}} \cdot \varphi,$$

где $K_{\text{ШВП}}$ [м/рад] — коэффициент передачи шарико-винтовой пары. Величина $S_{\text{ВЫХ}}$ с

точностью до единицы отсчета ЦДП соответствует значению входного кода $N_{\text{ВХ}}$.

Определение условий линеаризуемости ЦППСУ

Структурная схема анализируемой позиционной САУ представлена на рис. 2 (часть схемы, выполненная сплошными линиями).

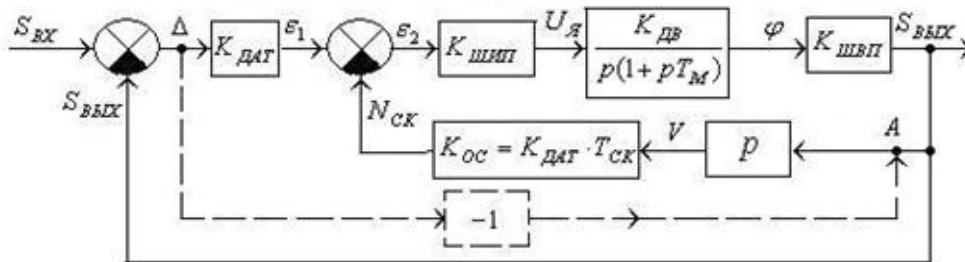


Рис. 2. Структурная схема ЦППСУ при широтно-импульсном управлении

Ошибка положения ОУ в цифровом виде определяется из выражения

$$\varepsilon_1[\text{имп}] = K_{\text{ДАТ}}(S_{\text{ВХ}} - S_{\text{ВЫХ}}) = K_{\text{ДАТ}} \cdot \Delta.$$

Дифференцирующее звено p осуществляет вычисление линейной скорости ОУ

$$V[\text{м/с}] = dS_{\text{ВЫХ}} / dt.$$

Полученное аналоговое значение скорости переводится в цифровую форму в соответствии с выражением

$$N_{\text{СК}}[\text{имп}] = K_{\text{ОС}}V = K_{\text{ДАТ}}T_{\text{СК}}V.$$

Изменяя величину $T_{\text{СК}}$, можно регулировать демпфирующее влияние скоростной обратной связи.

Последовательно соединенные преобразователь КШИ и усилитель МТК на структурной схеме представлены одним звеном с коэффициентом передачи $K_{\text{ШИП}}$. Его величина определяется из выражения

$$K_{\text{ШИП}} \geq \frac{M_{\text{С}}R_{\text{Я}}}{\Delta_{\text{ЗАД}}K_{\text{ДАТ}}C_{\text{М}}}.$$

При этом должно выполняться условие

$$M_{\text{ДВТР}} \geq M_{\text{С}},$$

где $M_{\text{ДВТР}}$ — момент трогания, развиваемый двигателем при заданной статической ошибке; $M_{\text{С}}$ — приведенный к валу двигателя момент сопротивления.

Момент трогания двигателя прямо пропорционален напряжению $U_{\text{Я}}$, подаваемому на якорь двигателя

$$M_{\text{ДВТР}} = \frac{U_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}} \cdot C_{\text{М}} = \frac{\Delta_{\text{ЗАД}}K_{\text{ДАТ}}K_{\text{ШИП}}}{R_{\text{Я}}} \cdot C_{\text{М}},$$

где $\Delta_{\text{ЗАД}}$ [м] — заданная ошибка позиционирования; $R_{\text{Я}}$ [Ом] — активное сопротивление якорной цепи двигателя; $C_{\text{М}}$ [Нм/А] — конструктивная постоянная двигателя.

Передаточная функция ИД по углу поворота φ вала двигателя определяется из выражения

$$W_{\text{ДВ}}(p) = \frac{\varphi(p)}{U_{\text{Я}}(p)} = \frac{K_{\text{ДВ}}}{p(1+pT_{\text{М}})(1+pT_{\text{Я}})},$$

где $K_{\text{ДВ}}$ [рад/сВ] — добротность двигателя по скорости; $T_{\text{М}}$ [с] — механическая постоянная времени привода; $T_{\text{Я}}$ [с] — электромагнитная постоянная времени цепи якоря.

Поскольку для ИД всегда соблюдается условие $4T_{\text{Я}} \leq T_{\text{М}}$ [3], то в практических расчетах используем выражение

$$W_{\text{ДВ}}(p) = \frac{\varphi(p)}{U_{\text{Я}}(p)} = \frac{K_{\text{ДВ}}}{p(1+pT_{\text{М}})}.$$

САУ с широтно-импульсным управлением относятся к нелинейным дискретным системам, и их исследование представляет собой сложную задачу [3; 12]. Однако при исследовании ЦППСУ в первом приближении их можно рассчитывать, пользуясь методами расчета непрерывных систем, если [1; 3; 12]:

- для интервала дискретности $T_{\text{УПР}}$ соблюдается условие теоремы Котельникова;
- алгоритм управления является линейным;
- квантованием по уровню можно пренебречь при наличии большого числа разрядов в преобразователях «перемещение ОУ — цифровой код» и «код — ширина импульса»;
- частота среза $\omega_{\text{СР}}$ находится на участке логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ), имеющем наклон -20 дБ/дек.

С помощью теоремы Котельникова можно установить, что при интервалах дискретности

$$T_{\text{УПР}} \leq \pi/\omega_{\text{СР}}$$

динамика дискретной системы не будет существенно отличаться от динамики соответствующей непрерывной системы.

Алгоритм управления является линейным, поскольку среднее напряжение на якоре прямо пропорционально величине ошибки ε_2 . Момент двигателя $M_{дв}$ пропорционален среднему току в якоре, который определяется средним значением напряжения $U_я$.

В ЦППСУ число разрядов в преобразователе «перемещение ОУ — цифровой код» (в канале обратной связи), как правило, равняется 16 и более [1], а число разрядов в преобразователе «код — ширина импульса» (в канале прямой связи) — 8 и более.

Если указанные выше условия соблюдаются, то при исследовании ЦППСУ удобно использовать критерий Найквиста для логарифмических характеристик [3; 10]. В соответствии с критерием Найквиста, при наличии единичной обратной связи по положению о практической приемлемости замкнутой САУ удобно судить по ЛАЧХ и логарифмической амплитудно-фазовой характеристике (ЛФЧХ) разомкнутой САУ. При проектировании в зависимости от класса САУ рекомендуется [5] выбирать запас по фазе $\varphi_3 \geq 30^\circ \div 60^\circ$, а запас по амплитуде $L_3 \geq$

$\geq |-6 \div -20|$ дБ. Дополнительное условие, ЛАЧХ должна пересекать ось частот с наклоном -20 дБ/дек.

Пример использования упрощенной методики анализа ЦППСУ

В качестве примера исследуем одну из ЦППСУ, разработанных при участии автора в ГИЦ «Институт физики высоких энергий» [4]. Система имеет следующие параметры: $M_c = 785$ Нм; $K_{дат} = 1 \cdot 10^6$ имп/м; $K_{шип} \geq 0.66$ В/имп; $c_M = 1180$ Нм; $R_я = 1$ Ом; $K_{дв} = 7.14$ рад/сВ; $T_M = 65 \cdot 10^3$ с; $T_я = 1 \cdot 10^{-4}$ с; $K_{швп} = 0.8 \cdot 10^{-3}$ м/рад.

На рис. 3 построены асимптотическая ЛАЧХ и ЛФЧХ ($L_1(\omega)$ и $L_2(\omega)$ соответственно) для разомкнутой САУ с передаточной функцией

$$W_{(p)} = \frac{S_{вых}(p)}{S_{вх}(p)} = \frac{K_{дат} K_{шип} K_{дв} K_{швп}}{p(1 + pT_M)} = \frac{3800[1/c]}{p(1 + 65 \cdot 10^{-3} p)}$$

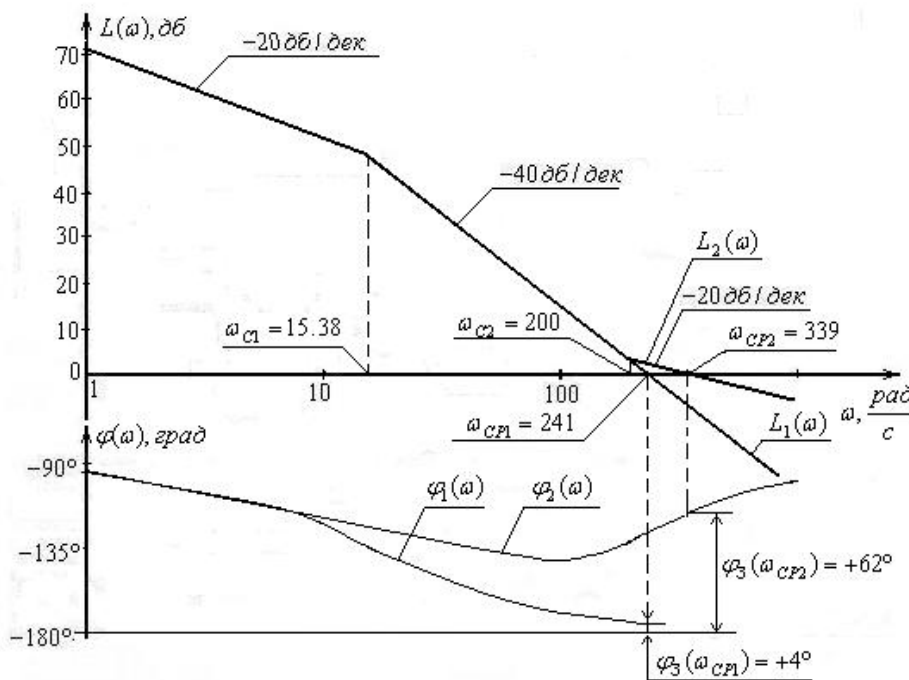


Рис. 3. Определение желаемого значения коэффициента скоростной обратной связи с использованием логарифмических характеристик

Анализ полученных ЛАЧХ и ЛФЧХ показывает, что при наличии только обратной связи по положению запас устойчивости по фазе $\varphi_3 = +4^\circ$, что значительно меньше требуемого. Наклон ЛАЧХ на частоте среза составляет -40 дБ/дек, а не -20 дБ/дек, как

требуется, т.е. данная САУ практически не приемлема.

Коррекцию САУ осуществим введением в структурную схему (см. рис. 2) скоростной обратной связи, охватывающей ис-

полнительный двигатель и ОУ. Определим параметры скоростной обратной связи.

Поскольку на вход ЦППСУ подается ступенчатый входной сигнал $S_{ВХ-1}(t)$, то скорость перемещения ОУ и ошибка $\Delta = S_{ВХ} - S_{ВЫХ}$ изменяются по одному и тому же закону. Действительно, при реакции системы на ступенчатый входной сигнал

$$\frac{d\Delta}{dt} = -\frac{dS_{ВЫХ}}{dt},$$

поскольку для ступенчатого сигнала $dS_{ВХ}/dt = 0$. Следовательно, структурную схему можно преобразовать следующим образом (пунктир на рис. 2) — разомкнуть обратную связь по скорости до точки *A* и подключить к точке *A* сигнал ошибки Δ с коэффициентом -1 .

В этом случае передаточная функция разомкнутой САУ будет следующей

$$\begin{aligned} W_{(p)} &= \frac{S_{ВЫХ}(p)}{S_{ВХ}(p)} = \\ &= \frac{K_{ДАТ} K_{ШИП} K_{ДВ} K_{ШВП} (1 + pT_{СК})}{p(1 + pT_M)} = \\ &= \frac{3800(1 + pT_{СК})}{p(1 + 65 \cdot 10^{-3} p)}. \end{aligned}$$

В приведенном выражении неизвестной величиной является длительность интервала $T_{СК}$ записи импульсов с ЦДП в реверсивный счетчик цифрового датчика скорости. Полагаем, что величина шага $T_{СК}$ должна удовлетворять условию теоремы Котельникова

$$T_{СК} \leq \pi/\omega_{СР1} \leq 0.013\text{с} \leq 13\text{мс}.$$

С другой стороны, для получения наклона -20 дБ/дек при пересечении ЛАЧХ с осью частот ($L_2(\omega)$ на рис. 3) должно соблюдаться условие $T_{СК} > 1/\omega_{СР1}$.

Следовательно, можно определить диапазон, в котором находится желаемое значение $T_{СК}$ $1/\omega_{СР1} < T_{СК} \leq \pi/\omega_{СР1}$.

Чем ближе к частоте среза $\omega_{СР1}$ значение частоты сопряжения $\omega_{С2} = 1/T_{СК}$, тем менее колебательным будет переходный процесс в системе [10].

Для упрощения алгоритма управления САУ желательно, чтобы величина $T_{СК}$ равнялась периоду $T_{УПР}$ формирования управляющего кода. Принято считать [9; 11], что значение $T_{УПР}$ связано с шириной полосы пропускания $\omega_{П}$ или временем установления замкнутой системы. Некоторые эмпириче-

ские правила рекомендуют, чтобы частота выборки была в 6—10 раз выше, чем полоса пропускания, или чтобы время установления соответствовало, по крайней мере, пяти интервалам выборки. Во многих коммерческих цифровых ПИД-регуляторах для определения $T_{УПР}$ используют следующее правило

$$T_{УПР} \approx \frac{0.15 \div 0.5}{\omega_{П}}.$$

Как правило, для удобства управления величину $T_{СК}$ выбирают равной или кратной значению $T_{УПР}$, т.е.

$$T_{СК} = kT_{УПР},$$

где $k = 1, 2, \dots$

Для исследуемой системы при $1/\omega_{СР1} = 4.15$ мс и $\pi/\omega_{СР1} = 13$ мс получаем

$$4.15 \text{ мс} < T_{СК} \leq 13 \text{ мс}.$$

С учетом указанных выше факторов в первом приближении выбираем величину $T_{СК} = 5 \cdot 10^{-3}$ с ($K_{ОС} = 5 \cdot 10^3$ имп/с/м).

При выбранном значении $T_{СК}$ следует проанализировать количество импульсов, поступающих на вход счетчика ЦДС на определенной скорости перемещения ОУ при заданной единице отсчета $\delta_{ДАТ}$. В ЦДС линейная скорость ОУ определяется с точностью до одного импульса, и погрешность измерения реальной скорости

$$\Delta_V = \frac{1}{N_{СК}} \cdot 100\%.$$

При $T_{СК} = 5$ мс, скорости перемещения ОУ $V_1 = 1$ см/с и $\delta_{ДАТ} = 1$ мкм/имп число импульсов, просчитанных счетчиком

$$N_{СК1} = T_{СК} V_1 / \delta_{ДАТ} = 50 \text{ имп}.$$

Погрешность измерения скорости $\Delta_{V1} = 2\%$. При малой скорости $V_2 = 2$ мм/с — число импульсов $N_{СК2} = 10$ имп и $\Delta_{V1} = 10\%$. При проектировании цифровой САУ в зависимости от полученных значений погрешностей $\Delta_V = 100\% / N_{СК}$ окончательно выбирается значение $T_{СК}$ и определяется скорость, на которой следует переходить ко второму способу ее измерения (при малых скоростях перемещения ОУ) [2].

При $T_{СК} = 0.005$ с = 5 мс передаточная функция исследуемой разомкнутой САУ будет определяться из выражения

$$W_{(p)} = \frac{3800(1 + 0.005p)}{p(1 + 0.065p)}.$$

В соответствии с этим выражением на рис. 3 построены асимптотическая ЛАЧХ $L_2(\omega)$ и ЛФЧХ $\varphi_2(\omega)$. Их анализ показывает, что запас по фазе $\varphi_3(\omega_{СР2}) = +62$, т.е. стал вполне приемлемым, наклон на частоте среза $\omega_{СР2}$ составляет -20 дБ/дек, что является необходимым условием обеспечения практически приемлемого качества переходного процесса.

Выводы

Предлагаемая методика позволяет значительно упростить процедуру анализа цифровой САУ. Однако следует учитывать, что корректность расчетов зависит от соблюдения приведенных в работе условий, а именно:

- величина $T_{СК}$ должна находиться в диапазоне

$$1/\omega_{СР1} < T_{СК} \leq \pi/\omega_{СР1},$$

окончательно ее значение выбирается в зависимости от величины единицы отсчета датчика $\delta_{дат}$ и значения $T_{УПР}$;

- число разрядов кода $N_{Р\text{ вых}}$ должно быть не менее 16, а число разрядов преобразователя «код — ширина импульса» — не менее 8;
- алгоритм управления является линейным, реализуемым в течении интервала времени $T_{УПР}$;
- ЛАЧХ скорректированной САУ пересекает ось абсцисс с наклоном -20 дБ/дек;
- входное воздействие должно быть ступенчатым, равным приращению координаты ОУ.

Библиографический список

1. Ахметжанов, А. А. Высокоточные системы передачи угла автоматических устройств / А.А. Ахметжанов. — Москва : Энергия, 1975. — 288 с.

2. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. — Москва : Академия, 2004. — 576 с.

3. Бесекецкий, В. А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекецкий, Е.П. Попов. — Санкт-Петербург : Профессия, 2007. — 752 с.

4. Евсиков, А. А. Учет упругих деформаций механических звеньев при моделировании высокоточных позиционных сервоприводов малой мощности / А.А. Евсиков, А.П. Леонов, Е.А. Устинов // Инженерная физика. — 2009. — № 10. — С. 25—28.

5. Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев. — Санкт-Петербург : Политехника, 2005. — 302 с.

6. Леонов, А. П. О построении математических моделей цифровых систем автоматического управления в режиме точного позиционирования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2011. — № 12. — С. 5—9.

7. Леонов, А. П. Реверсивный транзисторный преобразователь для управления двигателем постоянного тока / А.П. Леонов, В.В. Попов, Е.А. Устинов // Приборы и техника эксперимента. — 1978. — № 5. — С. 180—182.

8. Медведев, В. С. Микропроцессорное управление следящими приводами станков для обработки печатных плат в гибком автоматизированном производстве / В.С. Медведев, А.П. Леонов // Известия Академии Наук СССР. Техническая кибернетика. — 1987. — № 3. — С. 123—131.

9. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. — Санкт-Петербург : Невский диалект, 2001. — 557 с.

10. Astrom, K. J. Feedback Systems. An Introduction for Scientist and Engineers / K.J. Astrom, R.M. Murray. — Princeton, Oxford : Princeton Univ. Press, 2008. — 396 p.

11. Dorf, R. C. Modern control systems / R.C. Dorf, R.H. Bishop. — Prentice Hall, 2010. — 1104 p.

12. Fadali, M. S. Digital Control Engineering. Analysis and Design / M.S. Fadali, A. Visioli. — Burlington, MA : Academic Press, 2009. — 523 p.

Поступила в редакцию
25.03.2016

УДК 514.853

В. О. Соловьев**Уравнение Фридмана: вчера, сегодня, завтра**

В связи со столетием общей теории относительности (ОТО) кратко излагается история открытия А. Фридманом в 1922 г. уравнения эволюции Вселенной. Подчеркивается, что им впервые в космологической задаче был использован геометродинамический подход к ОТО и обнаружено уравнение гамильтоновой связи. Рассмотрены также некоторые современные обобщения ОТО и соответствующие модификации уравнения Фридмана.

Ключевые слова: общая теория относительности, космология, гамильтонов формализм, история физики, теория струн, массивная гравитация.

Об авторах

Соловьев Владимир Олегович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и естественных наук филиала «Протвино» Государственного университета «Дубна»; старший научный сотрудник отдела теоретической физики ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Институт физики высоких энергий» Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

В 2015 г. исполнилось 100 лет общей теории относительности (ОТО). Помимо А. Эйнштейна существенный вклад в создание ОТО внесли математики М. Гроссман и Д. Гильберт. На основе ОТО впервые была построена динамическая модель Вселенной. Это стало самым сильным предсказанием теории, многократно подтвердившимся наблюдениями. Открытое А. Фридманом в 1922 г. уравнение эволюции Вселенной вопреки первоначальному недоверию многих, включая и самого Эйнштейна, стало фундаментом современной космологии. История открытия, изменившего мировоззрение человечества подобно тому, как его изменила идея о вращении Земли вокруг Солнца, интересна и поучительна.

Статья Фридмана «О кривизне пространства» была закончена 29 мая 1922 г. и с сопроводительным письмом от 3 июня была отправлена в Лейден П. Эренфесту. И письмо, и рукопись, написанные по-русски, сохранились, находятся в архиве Лейденского университета и доступны пользователям интернета [2]. П. Эренфест, ученик Л. Больцмана, был женат на выпускнице Высших бестужевских курсов по физико-математическому направлению Татьяна Афанасьевой, с которой познакомился в Геттингене, с 1907 по 1912 гг. молодые су-

руги жили в Санкт-Петербурге. У себя на дому Эренфест организовал семинар по теоретической физике, посещавшийся многими будущими крупными физиками и математиками, в том числе А. Фридманом и его ближайшим другом Я. Тамаркиным. Перевод работы Фридмана на немецкий язык был выполнен в России, вероятно при участии будущего академика В.А. Фока, и представлен Эренфестом в ведущий физический журнал “*Zeitschrift fur Physik*” [12]. Позднее эта работа вышла на русском языке [3] и с тех пор многократно переиздавалась [4; 5].

Пятью годами ранее космологическая задача уже рассматривалась, сначала Эйнштейном, а затем голландским астрономом де Ситтером. Важно подчеркнуть, что подход Эйнштейна был характерен для него и использовал больше физическую интуицию, чем математику. Эйнштейн мысленно построил свою картину Вселенной и лишь после этого стал проверять, удовлетворяет ли она уравнениям ОТО. Для преодоления парадокса космологии Ньютона, приводившей в случае бесконечного мира однородно заполненного материей к бесконечному гравитационному потенциалу, Эйнштейн предположил, что пространство конечно и является простейшим из возможных — 3-мерной сферой. Однако такое решение не удовлетворяло первоначальным уравнениям ОТО. Тогда Эйнштейн изменил свою совсем ещё юную теорию и ввел в неё силу гравитаци-

онного отталкивания, т.е. космологическую постоянную. Вслед за Эйнштейном другое решение предложил де Ситтер, причём теперь постоянной кривизной обладало уже пространство — время, т.е. 4-мерное многообразие. И у Эйнштейна, и у де Ситтера ни одна из компонент метрики не зависела от времени.

В отличие от Эйнштейна Фридман не пытался угадать вид решения, а искал его как математик. Он принял те же физические предположения об однородности распределения материи и о её неподвижности, что и его предшественники. Это подразумевало использование сопутствующей системы координат и дополнялось выбором ортогонального по отношению к пространству направления времени. Фридман заметил, что величина, которая была названа Эйнштейном радиусом мира, может зависеть от времени. Были получены два уравнения, определяющие эту зависимость. В случае, когда материя ведёт себя как пыль, т.е. не оказывает давления, эти уравнения имеют следующий вид

$$\frac{3R'^2}{R^2} + \frac{3}{R^2} - \lambda = \kappa\rho,$$

$$\frac{R''}{R^2} + \frac{2RR''}{R^2} + \frac{1}{R^2} - \lambda = 0.$$

Нетрудно переписать уравнения Фридмана в виде двух уравнений классической механики материальной точки, одно из них представляет собой второй закон Ньютона, другое — закон сохранения механической энергии:

$$R'' = \frac{-GM}{R^2} + \omega^2 R,$$

$$\frac{R'^2}{2} - \frac{GM}{R} - \frac{\omega^2 R^2}{2} = \frac{-1}{2},$$

где

$$\omega^2 = \frac{\lambda}{3} \quad M = \rho V = \rho 4/3\pi R^3 \quad \kappa = 16\pi G.$$

В этой задаче вся материя Вселенной создаёт гравитационный потенциал, а положительная космологическая постоянная создаёт потенциал силы упругости Гука, но с обратным знаком. Отрицательная космологическая постоянная создавала бы обычную силу упругости (притяжение). Изюминкой, отличающей задачу космологии Фридмана

от ньютоновской задачи, является то, что величина, соответствующая полной механической энергии, дискретна и может принимать только три значения. Они соответствуют пространству постоянной положительной кривизны, плоскому пространству и пространству постоянной отрицательной кривизны. Фридман в первой статье [12] рассмотрел случай положительной кривизны, во второй [13] — отрицательной. Случай плоского пространства им специально не обсуждался, хотя для него был вычислен период мира, анализ этого случая проще, чем двух рассмотренных. Статическая Вселенная Эйнштейна соответствует неподвижно висящему в центральном поле пробному телу, уравновешенному силой гравитационного притяжения всего вещества и силой упругого отталкивания, линейно возрастающей при удалении от центра (космологической постоянной). Такое равновесие, очевидно, неустойчиво и поэтому невозможно в реальном мире. Вселенная де Ситтера оказывается пустой, т.е. лишённой материи и поэтому также не подходит для описания наблюдаемого мира. Не исключено, конечно, что вселенная де Ситтера пригодна для описания очень ранней или очень поздней космологии.

Фридман показал на основании полученных им уравнений, что для реальной Вселенной возможны три сценария. В приведенной нами механической трактовке они отличаются тем, пересекает ли уровень полной энергии график потенциальной энергии и также тем, каков начальный радиус мира. Если пересечения нет, то имеет место «монотонный мир первого рода», т.е. Вселенная рождается в сингулярности и бесконечно расширяется. Если есть пересечение, то возможен «монотонный мир второго рода», т.е. бесконечное расширение, начинающееся с нулевой скорости и с конечного радиуса мира, или «периодический мир», состоящий из циклов рождения, расширения до конечного радиуса и сжатия в сингулярность. Наблюдательные данные в то время не давали возможности сделать выбор между сценариями. Вскоре после смерти Фридмана (1925) анализ астрономических данных подтвердил расширение Вселенной. Намного позднее открытием реликтового излучения была подтверждена картина Большого Взрыва, исключая «монотонный мир второго рода». Наконец, открытие ускоренного рас-

ширения с большой вероятностью исключило периодический сценарий, и сейчас мы считаем наиболее вероятным сценарий монотонного мира первого рода.

Фридман первым стал изучать нестационарные решения ОТО вне рамок теории возмущений. Он обнаружил, что 00-компонента уравнений Гильберта — Эйнштейна не содержит вторых производных по времени, из чего следует, что эта компонента является уравнением связи. На уровне однородной и изотропной космологии Фридман продемонстрировал это уже в 1922 г. Только в 1950-х гг. математики занялись изучением задачи Коши в ОТО. Как вспоминала И. Шоке-Брюа, ей так и не удалось заинтересовать этим вопросом Эйнштейна. Структура связей была окончательно выявлена и исследована при построении гамильтонова формализма ОТО Дираком [11], а также Арновитом, Дезером и Мизнером [6]. Теперь мы знаем, что не только в случае пространства постоянной кривизны, но и в общем случае 00-компонента уравнений ОТО является гамильтоновой связью. Уилер подчеркивал, что в этом уравнении содержится целиком вся теория. Вычислением скобок Пуассона из гамильтоновой связи могут быть получены ещё три уравнения связи (0*i*-компоненты уравнений Гильберта — Эйнштейна) и 12 уравнений первого порядка по времени, комбинируя которые мы приходим к оставшимся 6 уравнениям ОТО (*ij*-компоненты). Каноническое квантование ОТО основано на уравнении Уилера — де Витта [10], которое получается квантованием гамильтоновой связи. На мини-суперпространстве квантуется, фактически, уравнение Фридмана.

В настоящее время главным вызовом для космологов являются проблемы тёмной энергии и тёмной материи, в связи с чем стали весьма популярными модифицированные теории гравитации. Одним из направлений модификации является введение массы гравитона. Этим направлением в течение 30 лет занимался А.А. Логунов с сотрудниками. Предложенная этой группой релятивистская теория гравитации (РТГ) не содержит свободных параметров помимо массы гравитона. Динамика Вселенной и здесь описывается уравнением Фридмана, только космологический член перестаёт быть постоянным и становится функцией от масштабного фактора. Эта функция при всех значениях аргу-

мента оказывается отрицательной. Для космологии РТГ предсказывает циклическую эволюцию, критическую плотность материи и плоскую геометрию пространства [1]. Однако в РТГ гравитационное поле имеет шесть степеней свободы, что означает присутствие духа Бульвара — Дезера [7].

Недавно возникла другая теория массивной гравитации, число степеней свободы в которой на единицу меньше и дух отсутствует. Предложенный де Рам — Габададзе — Толи [9] потенциал взаимодействия двух метрик содержит несколько свободных параметров, помимо массы гравитона. На фоне плоской метрики Минковского такая теория не позволяет получить космологию Фридмана. Одним из путей обхода этой трудности является постулат, что материя минимально взаимодействует с комбинацией из двух метрик, называемой эффективной метрикой. Однако в таком случае дух Бульвара — Дезера возрождается снова, правда, лишь при энергиях взаимодействия, превышающих обрезание. Другой путь заключается в переходе к теории бигравитации, где динамическими являются обе метрики, ситуация с духами при этом остается прежней [14].

Число вариантов модификации ОТО весьма велико. Но так или иначе динамика Вселенной в них описывается уравнением фридмановского типа. Весьма радикальным изменением стандартной космологии является картина идеального газа суперструн [8]. Если пространство — время содержит компактифицированные измерения, то струнные моды включают не только стоячие волны, но и моды наматывания, которые ведут себя при уменьшении радиуса совсем иначе. Имеет место новая симметрия — T-дуальность. Однако квадрат параметра Хаббла, входящий в уравнение Фридмана, оказывается инвариантным относительно преобразований T-дуальности, поэтому уравнения струнной космологии сохраняют определенную преемственность.

Библиографический список

1. Герштейн, С.С. Верхний предел массы гравитона / С.С. Герштейн, А.А. Логунов, М.А. Мествиришвили // ДАН. — 1998. — Т. 360, вып. 3. — С. 332—334.
2. Письма и рукописи статей Фридмана в архиве Пауля Эренфеста. — Электрон. дан. — URL: http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/Friedmann_archive (дата обращения: 13.01.2016 г.).

3. Фридман, А. А. Журн. Русск. физ.-хим. общ-ва. — 1924. — Т. 56, вып. 1. — С. 59.
4. Фридман, А. А. // УФН. — 1963. — Т. 80, вып. 3. — С. 439—446; 447—452. Специальный выпуск, посвященный памяти А.А. Фридмана (к 75-летию со дня рождения). — Электрон. дан. — URL: <http://ufn.ru/ru/articles/1963/7/> (дата обращения: 13.01.2016 г.).
5. Фридман, А. А. Собрание трудов. — Москва : Наука, 1966.
6. Arnowitt, R. In Gravitation, an Introduction to Current Research / R. Arnowitt, S. Deser, Ch.W. Misner ; edited by L. Witten. — New York, 1963.
7. Boulware, D. Can gravitation have a finite range? / D. Boulware, S. Deser // Phys. Rev. D. — 1972. — V. 6, Iss. 12. — P. 3368—3382.
8. Brandenberger, R. H. String gas cosmology after Planck // Cornell University Library e-print arxiv:1505.02381. — Электрон. дан. — URL: <http://arxiv.org/abs/1505.02381> (дата обращения: 14.01.2016 г.).
9. Rham, De C. Resummation of massive gravity / C. De Rham, G. Gabadadze, A.J. Tolley // Phys. Rev. Lett. — 2011. — V. 106, Article ID 231101.
10. De Witt, B. S. Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory // Phys. Rev. — 1967. — V. 160, iss. 5. — P. 1113—1148.
11. Dirac, P. A. M. Fixation of Coordinates in the Hamiltonian Theory of Gravitation // Phys. Rev. — 1959. — V. 114, iss. 3. — P. 924—930.
12. Friedman, A. Über die Krümmung des Raumes // Z. Phys. — 1922. — V. 10, iss. 1. — P. 377—386.
13. Friedmann, A. Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes // Z. Phys. — V. 21, iss. 1. — P. 326—332.
14. Soloviev, V. O. Hamiltonian cosmology in bigravity and massive gravity // Cornell University Library e-print arxiv: 1505.00840. — Электрон. дан. — URL: <http://arxiv.org/abs/1505.00840> (дата обращения: 14.01.2016 г.).

Поступила в редакцию
25.03.2016

УДК 519.872.2

Ю. А. Троян, А. А. Рубчинский**Разрешение конфликтов в марковских цепях**

Параллельные стохастические процессы в некоторых системах можно представлять как одновременное функционирование нескольких марковских цепей с одним и тем же множеством состояний. При этом состояния интерпретируются как неделимые ресурсы, поскольку в каждый момент времени в них может находиться не более одной цепи. Ситуация, при которой несколько цепей одновременно требуют перехода в одно и то же состояние, и представляет собой конфликт. Разрешение конфликта состоит в выборе той цепи, которой разрешается переход в конфликтное состояние, в то время как все остальные цепи, также желающие попасть в данное состояние, находятся в режиме ожидания, т.е. просто простаивают.

В работе предложен новый алгоритм разрешения подобного рода конфликтов, который может использоваться в ситуациях, когда известные ранее методы неприменимы.

Ключевые слова: системы массового обслуживания, управляемые марковские цепи с доходами, бернуллиевские процессы, разрешение конфликтов.

Об авторах

Троян Юрий Александрович — аспирант кафедры прикладной математики и информатики Государственного университета «Дубна».

Рубчинский Александр Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Государственного университета «Дубна».

Цепь Маркова — такая последовательность случайных событий с конечным или счётным числом исходов, что, нестрого говоря, при фиксированном настоящем будущее независимо от прошлого. Названа в честь А.А. Маркова [3].

Обычно под марковской цепью имеют в виду простую марковскую цепь, т.е. такую, где вероятности состояний в будущем зависят только от текущего состояния системы. Сложной же цепью Маркова называют такую, где состояния в будущем зависят от текущего состояния и от состояний на нескольких предыдущих шагах. В данной статье будут рассматриваться только простые цепи Маркова.

Процесс, работа которого описывается цепью Маркова, называется марковским. Наглядным примером такого процесса может служить поведение лягушки в пруду с кувшинками, где количество кувшинок ограничено, а лягушка время от времени перепрыгивает с одного листа кувшинки на другой по своему желанию в данный момент. Вероятность того, что она прыгнет на конкретный лист, зависит не от того, когда и на каких листьях лягушка побывала в прошлом, а от

её текущего местоположения.

Марковские цепи являются одним из распространённых инструментов моделирования стохастических систем.

Пусть некоторая система может находиться в каждый момент времени $t = 0, 1, \dots$ в одном из состояний множества $S = \{1, \dots, N\}$. Говорят, что поведение системы описывается марковской цепью с переходными вероятностями p_{ij} , если через единицу времени после того, как система находилась в состоянии $i \in S$, она с вероятностью p_{ij} оказывается в состоянии $j \in S$. Матрицу $P = (p_{ij})$ называют матрицей переходов или матрицей переходных вероятностей.

Бернуллиевским марковским процессом называют такой, у которого вероятность перехода в любое состояние зависит только от самого желаемого для перехода состояния, но не от состояния, из которого процесс может перейти в него.

Вероятность нахождения цепи в случайный момент времени в состоянии $i \in S$ называется стационарной вероятностью состояния i и обозначается через π_i ($i = 1, \dots, N$). Вектор $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_N)$ находится решением системы линейных уравнений:

$$\pi P = \pi, \quad \sum_{i=1}^N \pi_i = 1.$$

Приведём пример. Пусть некая фирма выпускает телевизоры, на которые спрос у населения может либо быть, либо нет. В зависимости от этого в конце каждого года фирма может находиться в одном из состояний: «спрос есть» (состояние 1) или «спроса нет» (состояние 2). Пусть вероятность сохранить уже имеющийся спрос в следующем году равна $4/5$, а вероятность появления в следующем году отсутствующего спроса равна $3/5$. Тогда работу фирмы можно описать марковской цепью с состояниями 1 и 2 и матрицей переходов

$$P = \begin{pmatrix} 4/5 & 1/5 \\ 3/5 & 2/5 \end{pmatrix}.$$

Теперь усложним ситуацию. Введём возможность управления марковской цепью и доходы в зависимости от одной из выбранных стратегий. Пусть фирма, находясь в состоянии 1 (спрос есть), может увеличить спрос путём проведения рекламной компании. Но это потребует дополнительных затрат, что уменьшит доход. В состоянии 2 (спроса нет) фирма может увеличить вероятность появления спроса путём увеличения затрат на исследования, и это тоже потребует дополнительных расходов. Выделим две стратегии. Первая состоит в отказе от дополнительных затрат (на рекламу и исследования), вторая — в согласии на них. Пусть матрицы переходных вероятностей и матрицы доходов для данных стратегий имеют вид

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 0,4 & 0,6 \end{pmatrix}, R_1 = \begin{pmatrix} 9 & 3 \\ 3 & -7 \end{pmatrix} \\ P_2 = \begin{pmatrix} 0,8 & 0,2 \\ 0,7 & 0,3 \end{pmatrix}, R_2 = \begin{pmatrix} 4 & 4 \\ 1 & -19 \end{pmatrix}.$$

Смысл матриц P_1, P_2, R_1, R_2 таков. При отказе от дополнительных затрат (стратегия 1) вероятности переходов задаются матрицей P_1 , а доходы, в зависимости от состояния, — матрицей R_1 . Так, если система находится в состоянии 2, то при стратегии 1 с вероятностью $0,6$ она в нём так и останется (спрос так и не появится), а потери составят 7 единиц (например, 7 миллионов долларов). При стратегии 2 (т. е. при попытках активных действий) вероятность отсутствия спроса (при его отсутствии в данный момент) будет заметно меньше ($0,3$ вместо $0,6$), но и потери будут значительно больше — 19 вместо 7.

В рассматриваемой ситуации имеет место управляемая марковская цепь. Управление состоит в выборе стратегии. Стратегией

называется последовательный выбор управлений в последовательные моменты времени. Стратегии, которые зависят только от состояния системы, называют стационарными.

Оптимальные стратегии — стратегии, максимизирующие средний доход. По крайней мере одна из стационарных стратегий является оптимальной [4].

Задача разрешения конфликтов в марковских цепях

Во время работы системы из нескольких процессов некоторым из них может одновременно потребоваться один и тот же ресурс, который может быть предоставлен только одному из процессов. Такой ресурс является неделимым, а сама конфликтная ситуация требует оптимального разрешения.

Подобного рода конфликты возникают многократно в самых разных системах, скажем, во время работы компьютера. Внутри каждого процесса можно выделить некоторые критические участки, когда ему необходим некий неделимый ресурс. Так как в каждый момент времени неделимый ресурс может быть предоставлен не более чем одному процессу, то все остальные претендующие на этот ресурс процессы временно блокируются, и должны ждать, пока он не освободится. Конфликты, таким образом, сопряжены с задержками процессов, что снижает производительность системы.

Возникает задача поиска оптимального правила разрешения конфликтов — такого порядка предоставления неделимых ресурсов процессам, при которых потери от конфликтов минимальны.

Опишем поведение процесса марковской цепью. Пусть имеется n процессов, при этом k -й процесс может находиться в одном из $m+1$ состояний $0, 1, \dots, m$, которые изменяются в соответствии с переходными вероятностями $p_{ij}^k (i, j = 0, 1, \dots, m; k = 1, \dots, n)$.

Все состояния, кроме состояния 0, соответствуют неделимым ресурсам, т. е. в любом из них может находиться не более одного процесса одновременно. В состоянии 0 может одновременно находиться любое число процессов.

Конфликтом в такой системе будет желание более чем одного процесса перейти в одно и то же состояние из множества $\{1, \dots, m\}$, разрешением такого конфликта будет пропуск в соответствующее «конфликтное» состояние ровно одного процесса из

конфликтующих, чей выбор определяется правилом разрешения конфликтов. Остальные конфликтные процессы до получения требуемого ресурса находятся в состоянии ожидания. Не участвующие в конфликте процессы изменяют свои состояния в соответствии со своими переходными вероятностями.

Рассмотрим простейший случай с двумя процессами и двумя состояниями. Матрицы переходных вероятностей отдельных процессов таковы:

$$P_1 = \begin{pmatrix} p_{00}^1 & p_{01}^1 \\ p_{10}^1 & p_{11}^1 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} p_{00}^2 & p_{01}^2 \\ p_{10}^2 & p_{11}^2 \end{pmatrix}.$$

	(0,0)	(0,1)	(1,0)	(1,1)
(0,0)	$p_{00}^1 p_{00}^2$	$p_{00}^1 p_{01}^2$	$p_{01}^1 p_{00}^2$	$p_{01}^1 p_{01}^2$
(0,1)	$p_{00}^1 p_{10}^2$	$p_{00}^1 p_{11}^2$	$p_{01}^1 p_{10}^2$	$p_{01}^1 p_{11}^2$
(1,0)	$p_{10}^1 p_{00}^2$	$p_{10}^1 p_{01}^2$	$p_{11}^1 p_{00}^2$	$p_{11}^1 p_{01}^2$

Так как в состоянии 1 может находиться лишь один из процессов, то другой должен ждать освобождения ресурса, не меняя своего намерения перейти в это состояние (без получения требуемого ресурса дальнейшая работа процесса невозможна). Таким образом, если при разрешении конфликта мы отдаём предпочтение первому процессу, что последняя строка матрицы имеет вид:

(1,1)	0	p_{10}^1	0	p_{11}^1
-------	---	------------	---	------------

Если же предпочтение отдаётся второму процессу, последняя строка имеет вид:

(1,1)	0	0	p_{10}^2	p_{11}^2
-------	---	---	------------	------------

Итак, имеется управляемая марковская цепь с четырьмя состояниями. Попадание в состояние (1,1) означает «простой» одного из процессов, потому будем считать доход системы в состоянии (1,1), равным -1 (можно также считать потери системы в том состоянии, равными 1), а во всех остальных состояниях равным 0. Наша задача свелась к поиску оптимальной стратегии управления полученной марковской цепью.

Одновременная работа обоих процессов может быть описана одной марковской цепью с четырьмя состояниями: (0,0), (0,1), (1,0), (1,1). Здесь первая компонента соответствует первому процессу, вторая — второму.

Первые три состояния означают, в каком из состояний находится каждый из процессов. Но одновременное их нахождение в состоянии 1 невозможно, поэтому состояние (1,1) означает, что оба процесса только намереваются перейти в это состояние.

Первые три строки матрицы переходов P имеют вид:

Заметим, что работа системы должна быть максимально простой и очень быстрой, поэтому и критерий предпочтения того или иного ресурса должен считаться быстро и не требовать решения задачи линейного программирования большой размерности. Заметим также, что число состояний цепи в случае n процессов и двух ресурсов ($m = 1$) равно 2^n , а в случае двух процессов и ($m + 1$) ресурсов — 2^m .

Давно известны рекуррентный и итерационный методы поиска оптимальных стратегий в марковских системах с заранее известными матрицами переходов и доходов [5]. Оба они не подходят нам ввиду требования как можно более быстрых вычислений. Кроме того, некоторые самые простые случаи были рассмотрены ещё в 1980-х годах. Так, для случая двух бернуллиевских процессов и двух ресурсов, из которых один — неделимый, была доказана теорема, что в таком случае следует отдавать предпочтение процессу с наименьшей вероятностью обращения к конфликтному ресурсу [2]. Однако уже тот же самый случай, но с небернуллиевскими процессами (формула 1), рассмотрен не был.

$$P_1 = \begin{pmatrix} c_0 & 1 - c_0 \\ c_1 & 1 - c_1 \end{pmatrix}, P_2 = \begin{pmatrix} c_2 & 1 - c_2 \\ c_3 & 1 - c_3 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Применение того же самого подхода к вышеуказанному случаю (предпочтение процесса с наименьшей вероятностью обращения к конфликтному ресурсу) привело к тому, что для порядка 14 % случаев конфликты разрешаются неоптимальным образом. В более точной формулировке: правило разрешения конфликтов, при котором в конфликтное состояние переходит та из марковских цепей, для которой стационарная вероятность данного состояния меньше, примерно в 14 % случаев (при случайном задании цепей) оказывается неоптимальным, т.е. общее время простоев оказывается больше, чем при противоположном решении. То же самое верно и для цепей большей размерности. Хорошо известно (см., например, [5]), что задача определения оптимальной стратегии сводится к задаче линейного программирования, однако размерность задачи для определения оптимальных стратегий разрешения конфликтов растет с ростом числа состояний и процессов экспоненциально, так что ни о какой скорости решения, что критично при разрешении конфликтов в вычислительных системах, говорить не приходится.

Таким образом, единственным приемлемым решением проблемы становится поиск приближённого решения, требующего минимум вычислений, но дающего небольшой процент неоптимальных решений.

Одним из наиболее простых путей поиска такого решения стала классификация большого числа разных систем, для которых заранее было точно подсчитано оптимальное решение. В данной работе эта идея для простоты изложена для рассматриваемого случая двух процессов и одного конфликтного состояния.

Требовалось, по сути дела, определить разделяющую функцию в четырёхмерном пространстве. В целях поиска наиболее быстрого с точки зрения вычислений решения предполагалось искать линейную функцию.

Использовался следующий классический алгоритм поиска разделяющей функции (см, например, его описание в [1]):

1. Для каждой из множества четырёхмерных точек (c_0, c_1, c_2, c_3) , $c_i \in (0, 1)$ рассчитать оптимальное правило разрешения

конфликтов (отдавать предпочтение первому либо второму процессу) во время работы системы (1) и соответственно классифицировать точку как принадлежащую к одному из двух классов — 1-му или 2-му (какому процессу отдавать предпочтение).

2. Положить i равным 0, j_A и j_B равными 1, C_A^0 равным любой точке из класса 1, C_B^0 равным любой точке из класса 2, $S_A^0 = \frac{(C_A, C_A)}{2}$, $S_B^0 = \frac{(C_B, C_B)}{2}$, $F(x) = (C_A^0 - C_B^0, x) - (S_A^0 - S_B^0)$, где (p, q) означает скалярное произведение векторов p и q .

3. Положить $i = i + 1$.

4. Выбрать следующую точку x^i , если больше точек нет, остановить работу.

5. Если $F(x^i) > 0$, а x^i принадлежит классу 1, или же если $F(x^i) < 0$, а x^i принадлежит классу 2, то положить $C_A^i = C_A^{i-1}$, $S_A^i = S_A^{i-1}$, $C_B^i = C_B^{i-1}$, $S_B^i = S_B^{i-1}$ и перейти к пункту 3.

6. Если $F(x^i) < 0$, то положить $C_A^i = C_A^{i-1} + \gamma^{j_A}(x^i - C_A^{i-1})$, $S_A^i = S_A^{i-1} + \gamma^{j_A}[(C_A^i, x^i) - 2S_A^{i-1}]$, $C_B^i = C_B^{i-1}$, $S_B^i = S_B^{i-1}$, $j_A = j_A + 1$ и перейти к пункту 3.

7. Иначе положить $C_B^i = C_B^{i-1} + \gamma^{j_B}(x^i - C_B^{i-1})$, $S_B^i = S_B^{i-1} + \gamma^{j_B}[(C_B^i, x^i) - 2S_B^{i-1}]$, $C_A^i = C_A^{i-1}$, $S_A^i = S_A^{i-1}$, $j_B = j_B + 1$ и перейти к пункту 3.

В пунктах 6 и 7 $\gamma^j = \frac{1}{2^j}$.

Найденная функция имеет следующий вид:

$$f(c_0, c_1, c_2, c_3) = c_0 + 3c_1 - c_2 - 3c_3. \quad (2)$$

Как видно, критерий крайне быстро вычисляется — требуются лишь два умножения и три сложения.

Проверим эффективность критерия. Для случайно сгенерированной системы попытаемся предсказать её оптимальное разрешение, используя только что найденный критерий, а потом проверим правильность предсказания, проведя численный эксперимент и сравнив количество конфликтов на итерацию в случаях предпочтений одного или другого процесса. Результаты показаны в таблице.

Результаты проверки эффективности критерия (2)

№	Δ	№	Δ	№	Δ	№	Δ
1	0,00546	26	0,00952	51	0,00507	76	0,01654
2	0,06924	27	0,02132	52	0,0292	77	0,0114
3	0,00272	28	0,04244	53	0,01611	78	0,03135
4	0,06168	29	0,00202	54	0,01393	79	0,00799
5	0,00928	30	0,0988	55	0,00535	80	0,00328
6	0,07463	31	0,01816	56	0,03907	81	0,03244
7	0,02794	32	0,00655	57	0,00264	82	0,02439
8	0,00629	33	0,00785	58	0,00943	83	0,00446
9	0,0529	34	0,00512	59	0,01321	84	0,00549
10	0,02714	35	0,00467	60	0,04453	85	0,02444
11	0,00629	36	0,00264	61	0,00625	86	0,02952
12	0,07312	37	0,00503	62	0,01209	87	0,00628
13	0,00555	38	0,13575	63	0,00638	88	0,00223
14	0,06917	39	0,00171	64	0,01161	89	0,04015
15	0,00358	40	0,08311	65	0,0001	90	0,00985
16	0,00752	41	0,01191	66	0,00935	91	0,01495
17	0,01413	42	0,0297	67	0,00473	92	0,01875
18	0,0065	43	0,00441	68	0,00825	93	0,00852
19	0,01049	44	0,00354	69	0,08494	94	0,00905
20	0,02519	45	0,00666	70	0,01557	95	0,00219
21	0,02388	46	0,02326	71	0,00602	96	0,0363
22	0,01367	47	0,04656	72	0,00329	97	0,06301
23	0,00584	48	0,00647	73	0,04856	98	0,013
24	0,00573	49	0,02535	74	0,1182	99	0,0039
25	0,00375	50	0,03838	75	0,01273	100	0,00517
Сумма							2,20388
Процент							≈2,2
Процент неудачных предсказаний:							≈3,2

Примечание: № — номер неудачно предсказанного эксперимента;
Δ — разница числа конфликтов на итерацию.
Удачно предсказанные эксперименты в таблице не представлены.

Итак, при применении данного критерия неоптимальные решения получаются только примерно в 3 % случаев. Кроме того,

конфликты при данных неоптимальных решениях случаются всего на 2 % чаще, что является вполне приемлемым результатом.

Заключение

Была рассмотрена задача оптимального разрешения конфликтов в управляемых марковских цепях, когда разным процессам одновременно требуется один и тот же неделимый ресурс. Существующие на настоящий момент точные методы не подходят для решения данной задачи в силу ограничений по скорости разрешения конфликтов. На примере простого случая с двумя общими марковскими процессами и двумя ресурсами (один неделимый) был продемонстрирован способ решения проблемы в виде поиска приближённого решения, которое не требует сложных расчётов, но достаточно точно. Предполагается продолжить исследования на системах больших размерностей. В частности, кроме приведенного алгоритма построения разделяющей плоскости предполагается рассмотреть метод Вапника, известный под названием *SVM (support vector machine)*.

Не менее важно рассмотреть случай, когда матрицы переходных вероятностей неизвестны или известны не полностью. В этих случаях речь может идти об адаптивных правилах разрешения конфликтов. Вместо оптимальных в таких случаях рассмат-

риваются так называемые целесообразные правила. По определению, целесообразными называются правила, которые приводят к результатам лучшим, чем при случайном выборе. В одной простой ситуации такое правило было найдено Генинсоном [2], однако в более общих случаях вопросы остаются открытыми.

Библиографический список

1. Браверман, Э. М. Структурные методы обработки эмпирических данных / Э.М. Браверман, И.М. Мучник. — Москва : Наука, 1983.
2. Генинсон Б.А. Разработка и исследование оптимальных правил разрешения конфликтов в многопроцессорных системах и алгоритмов их реализации : дисс. ... канд. техн. наук. — Москва : Институт проблем управления, 1984.
3. Кельберт, М. Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. 2. Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения / М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов. — Москва : МЦНМО, 2009.
4. Рубчинский, А. А. Методы и модели принятия управленческих решений / А.А. Рубчинский. — Москва : Юрайт, 2015.
5. Ховард, Р. А. Динамическое программирование и марковские процессы / Р.А. Ховард. — Москва : Советское радио, 1964.

Поступила в редакцию
25.03.2016

УДК 591.5;598.279.252

А. А. Хромов**Биотопическое распределение и связь численности ушастой совы (*Asio otus* L.) с обилием мелких млекопитающих в городских ландшафтах северного Подмосковья**

Представлены сведения о биотопическом распределении ушастой совы (*Asio otus* L.) в г. Дубна с 2006 по 2015 гг. Показана связь динамики численности вида с обилием мелких млекопитающих. Показана связь питания сов с обилием представителей родов *Microtus* и *Myodes*. Приведены сравнения с соседними территориями исследований (модельный участок в заказнике «Журавлиная родина»).

Ключевые слова: *Asio otus*, биотопическое распределение, динамика численности, биотические факторы.

Об авторе

Хромов Андрей Анатольевич — кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и наук о Земле Государственного университета «Дубна».

Ушастая сова (*Asio otus* L.) является обычным в европейской России видом сов, населяющим различные, в том числе урбанизированные, территории и в последние десятилетия проявляющим определенную степень синантропности [3; 4; 6]. Ландшафты малых городов, в отличие от крупных населенных пунктов, во многом сохранили черты естественных природных комплексов. Поэтому они могут быть привлекательным для обитания ушастых сов с точки зрения кормовой базы и возможного нивелирования естественных факторов беспокойства. Обилие мелких млекопитающих является одним

из определяющих факторов численности вида [1; 2; 14; 15; 16].

Район исследований. Для исследования был выбран модельный участок, расположенный на севере Московской области в г. Дубна, который представляет собой неоднородный комплекс местообитаний с разной степенью антропогенной нагрузки. Общая площадь модельной территории составляет 10,2 км², она включает хвойные и смешанные лесные массивы, пойменные сенокосные луга с кустами ивы, лесопарковую зону набережной и городскую застройку (табл. 1).

Таблица 1. Площадь различных типов местообитаний на территории модельного участка

Основной тип местообитания	Площадь, км ²	Доля, %
Лесные массивы, примыкающие к открытым пространствам или к городской застройке	2,47	24,2
Лесопарковая зона вдоль набережной р. Волги	0,57	5,60
Луга пойменные (сенокосные) с ивовыми полосами и низинами	4,07	39,9
Городская застройка и прочее	2,09	20,5
Водоемы	1,00	9,80
Общая площадь модельного участка	10,20	100,0

Территория модельного участка за период исследований не претерпела каких-либо серьезных изменений, связанных с воздействием человека, хотя некоторые местообитания частично были затронуты городским благоустройством.

Материал и методы

Первые наблюдения приходятся на 2006 г. (зафиксирован факт гнездования на модельном участке, отмечены отдельные особи). Учёты территориальных пар ушастых сов проводили ежегодно в течение 9 лет (2007—2015 гг.) с марта по июль. Основной акцент был сделан на поиск гнезд и выводков в мае и июне (период появления и

выкармливания птенцов). При обнаружении доступных для осмотра жилых гнезд, занятых ушастой совой, старались осуществлять их регулярную проверку. К сожалению, подавляющее большинство гнезд располагалось на вершинах высоких деревьев, поэтому их осмотр не представлялся возможным. Число вылетевших (или находящихся в гнезде) птенцов оценивали визуально и (или) по вокализации. Все случаи нахождения вокализирующих слетков мы считали фактами успешного гнездования, а количество вылетевших или находящихся на грани выхода из гнезд птенцов принимали за меру эффективности размножения. Во всех сомнительных случаях мы приводим минимальные достоверные сведения, поэтому некоторые результаты могут быть занижены.

Для оценки потенциальной кормовой базы проводили отловы мелких млекопитающих ловушками Геро. Обилие оценивали при помощи методики стандартных ловушко-линий [8]. Отловы проводили один раз в год (в конце мая или в июне) в двух типах сообществ: лесные биотопы и пойменные луга с редкими ивняками. Линии устанавливали таким образом, чтобы результаты учета в равной степени охватывали открытые пространства и лесные массивы. Проверку линий осуществляли 1 раз в сутки. Всего отработано 1225 ловушко-суток. Для получения сведений о питании ушастых сов проводили анализ погадок, собранных в разные годы (всего разобрано 47 погадок). Определение видовой принадлежности костных остатков млекопитающих проводили по черепным признакам и морфологии щечных зубов [5]. Определения посткраниального материала не проводили, поскольку изучение содержимого погадок носило ознакомительные цели и осуществлялось нерегулярно.

Статистическую обработку производили в программе *Statistica 6.0*. Корреляционный анализ проводили с использованием непараметрического коэффициента Спирмена (r_s).

Результаты и обсуждение

Численность и распределение. В период с 2006 по 2015 гг. на модельной территории выявлено 13 гнездовых участков, на которых достоверно установлено 20 случаев пребывания территориальных пар и 17 успешных случаев гнездования ушастой совы. Чис-

ленность птиц варьировала и в разные годы составляла от 0 до 7 пар. В 2006 г. обнаружено не менее 2-х пар, в 2007 г. — 2 пары, в 2008 г. — 7 пар, в 2009 г. — 1 пара, в 2010 г. — 1 пара, в 2011 г. — 1 пара, в 2012 г. — не гнездились, в 2013 г. — 4 пары, в 2014 г. — не гнездились, в 2015 г. — 2 пары. Соответственно, плотность населения варьирует от 0 до 0,7 пар/км² и в среднем составляет 0,2 пар/км².

Некоторые из типов местообитаний птицы занимали регулярно, а расположенные на них гнездовые участки нередко из года в год совпадали (рис. 1). На трех участках птицы использовали гнезда повторно. В частности, одно сорочье гнездо использовалось совами в течение 2 лет (в 2007 и 2008 гг.), одно из гнезд серой вороны — в течение 2 или 3 лет (в 2008—2010 гг.), а гнездо грача птицы занимали дважды с годичным перерывом (в 2013 и 2015 гг.). Подробные сведения о местообитаниях, гнездовых территориях и регулярности их использования представлены в табл. 2.

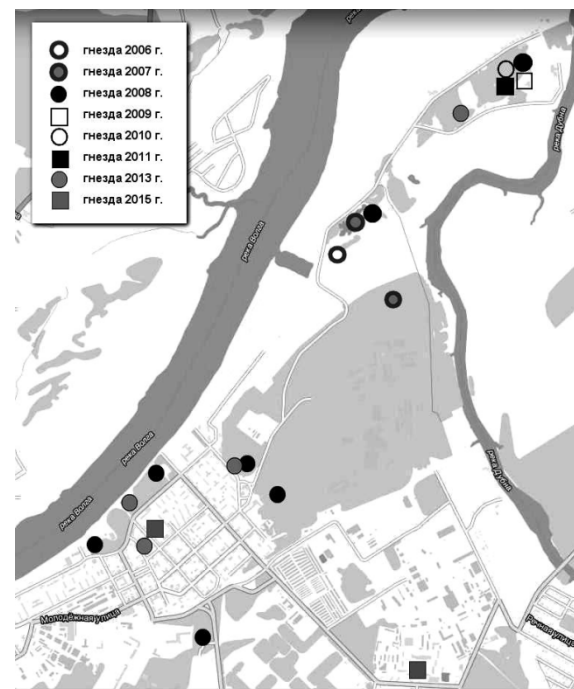


Рис. 1. Гнездование ушастой совы в 2006—2015 гг. на модельном участке

Таблица 2. Местообитания ушатовой совы на модельном участке и регулярность их использования в 2006—2015 гг.

Краткое описание основных местообитаний	Площадь, км ² (доля, %)	Кол-во гнездовых участков	Кол-во успешных гнездований	Регулярность заселения, лет (доля, %)*
Лес преимущественно сосновый (Ратминский бор)	0,35 (3,4)	2	4	5 (71)
Лес преимущественно еловый (местами сосновый и сосново-берёзовый) к северу от городской застройки	1,00 (9,8)	3	4	3 (43)
Лесной массив смешанный (местами разреженный и увлажненный) с фрагментами старых огородов	0,32 (3,1)	2	2	3 (43)
Лес преимущественно сосновый в незастроенной части города	0,30 (2,9)	1	1	1 (15)
Лес смешанный, преимущественно из молодой березы и ивы (зарастающий торфяник)	0,50 (4,9)	0	0	- (-)
Лесопарковая зона вдоль набережной р. Волги	0,57(5,6)	4	5	3 (43)
Луга пойменные (сенокосные) с редкими полосами ивы (вдоль дорог, канав) в правобережье р. Волга	1,90 (18,6)	0	0	- (-)
Луга пойменные (сенокосные) с ивовыми низинами в левобережье р. Волга	2,17 (21,3)	0	0	- (-)
Городская застройка и прочее	2,09 (20,5)	1	1	1 (15)

* Доля указана из расчета на 7 лет. Сведения за 2006 г., которые могут быть неполными, а также за годы, в которые птицы на модельном участке не гнездились (2012 и 2014 гг.), в расчет не брались.

Регулярно заселяемыми были 4 из 9 местообитаний, регулярность их использования составляет 43—71 % случаев (табл. 2). Эти местообитания представляют собой лесные участки разного размера и протяженности, примыкающие к открытым пространствам или к городской застройке и лесопарковую зону набережной. Другие местообитания птицы использовали крайне редко или не использовали совсем (регулярность их использования составляет 0—15 % случаев).

Наиболее интересные и информативные результаты получены в 2008 г., когда плотность поселения ушастых сов на модельной территории были максимальным (0,7 пар/км²). В частности, в этот год минимальное расстояние между ближайшими гнездами составило 0,27 км, а среднее расстояние между ближайшими гнездами для всего модельного участка — 0,98 км ($SD = 0,59$). Все обнаруженные в разные годы гнездовые участки можно условно отнести к двум типам. К первому типу мы относим лесные опушки и массивы, примыкающие к открытым луговым пространствам

(62 % гнездовых участков при $n = 13$). Пары, занимающие этот тип участков, использовали открытые пространства в качестве охотничьих территорий. К этому же типу мы также относим гнездовые участки, расположенные в лесопарковой зоне на правом берегу р. Волги. В данном случае гнезда удалены от открытых луговых пространств на ширину реки, которая в среднем составляет 0,30—0,35 км. Гнездящиеся на этих участках совы охотились на лугах в левобережье, о чем свидетельствуют наши наблюдения за перемещениями взрослых птиц (в первую очередь птиц с кормом). Ко второму типу мы относим лесные опушки и массивы, примыкающие к городской застройке (38 % гнездовых участков при $n = 13$). Эти участки расположены на некотором удалении от открытых луговых пространств (0,6 км или более), однако в непосредственной близости могут располагаться открытые участки техногенного происхождения, лесные поляны и зарастающие пустыри (торфяники), старые садовые участки и т.п. К сожалению, мы не обладаем достаточной информацией об охотничьих территориях птиц, обитающих на

втором типе участков, поскольку такие местности плохо просматриваются и наблюдения за перемещениями сов затруднительны.

Сроки и успех размножения. Самая ранняя регистрация токующего самца на гнездовом участке зарегистрирована 28 февраля 2008 г., но в большинстве случаев первые регистрации токующих птиц весной приходятся на середину марта. Подобные результаты получены и для модельной территории «Апсарёвское урочище» в заказнике «Журавлиная родина», где в период с 2001 по 2012 гг. первые токующие птицы отмечены с начала февраля, а в среднем приходятся на 18 марта [7; 13].

Во всех случаях совы занимали гнезда вороновых птиц (серая ворона, сорока, грач, ворон), причем в 72 % случаев (при $n = 18$) птицы предпочитали гнезда серой вороны, а подавляющее большинство пар (67 %) выбирали гнезда, расположенные на соснах. Отмечены также случаи расположения гнезд на ели, тополе, ольхе, иве и мелколистном вязе (табл. 4). Отметим, что предпочтение в выборе совами гнезд, замаскированных в кронах

хвойных деревьев, в целом характерно для северной части Европейской России [6; 11].

Появление птенцов, способных к громкой вокализации, отмечено с конца мая по начало июля. По ряду причин, о которых сказано выше, мы не обладаем информацией о полноте кладок и точных сроках появления птенцов. За период наблюдений у 20 гнездившихся пар отмечено 46 слетков, т.е. на одну пару в среднем приходится 2,3 слетка. Эффективность гнездования по годам имеет существенные отличия. Подробная информация о первых регистрациях птиц на модельном участке, гнездах, количестве слетков и эффективности гнездования представлены в табл. 3 и 4. Если учетов токующих птиц весной не проводили либо проведенные учеты не дали положительных результатов, дата первой регистрации не указана. Появление вокализирующих птенцов во всех местообитаниях происходило в близкие сроки. Так, в 2008 г. все семь выводков обнаружены 25—31 мая, и все они были в возрасте 20—30 дней, а в 2013 г. все четыре выводка такого же возраста найдены в период с 24 июня по 02 июля.

Таблица 3. Сроки и эффективность размножения ушастой совы на модельном участке

Год	Первая регистрация	Численность, кол-во гнездящихся пар	Кол-во вылетевших птенцов	Среднее кол-во птенцов на 1 гнездившуюся пару
2006	-	2+	2+	-
2007	-	2	3+	1,5
2008	28.02.2008	7	19+	2,7
2009	15.03.2009	1	3+	3,0
2010	-	1	2+	2,0
2011	-	1	-	-
2012	-	-	-	-
2013	19.04.2013	4	8+	2,0
2014	-	-	-	-
2015	-	2	9+	4,5
Всего на модельном участке		20 (18*)	46 (44*)	2,3 (2,4*)
Средний показатель / он же в гнездовые годы		2,0 / 2,5*	4,6 / 6,3*	

* Сведения за 2006 г., которые могут быть неполными, а также за годы, в которые птицы на модельном участке не гнездились и не проявляли территориальности (2012 и 2014 гг.), в расчет не брались.

Примечание: численность пар или птенцов, указанная со знаком «+», означает, что приведены минимальные достоверные сведения (возможно, результаты несколько занижены). Знак «-» в колонке «Первая регистрация» обозначает отсутствие сведений.

Таблица 4. Расположение гнезд и эффективность размножения ушастой совы на модельном участке

Год	Местообитание	Прежний хозяин гнезда	Порода дерева	Высота гнезда, м	Дата обнаружения вокализирующих птенцов (в возрасте 20—30 дней)	Кол-во вылетевших птенцов
2006	Лесной массив смешанный	сорока	ива	3	30.05	2+
2006	Лесной массив смешанный	-	-	-	-	-
2007	Лес еловый	ворона	ель	11	03.06	3
2007	Лесной массив смешанный	-	-	-	-	-
2008	Лесной массив смешанный	сорока	сосна	4,5	25.05	3
2008	Лесопарковая зона	ворона	тополь	15	30.05	3
2008	Лес елово-сосновый	ворона	сосна	15	30.05	2+
2008	Лес преимущественно сосновый	ворона	сосна	15	31.05	2+
2008	Лесопарковая зона	ворона	ольха	8	31.05	2+
2008	Лес преимущественно сосновый	ворона	сосна	17	31.05	3
2008	Лес сосновый	ворона	сосна	17	30.05	2+
2009	Лес сосновый	ворона	сосна	17	31.05	3+
2010	Лес сосновый	ворона	сосна	17	15.06	2+
2011	Лес сосновый	ворон	сосна	17	-	-
2013	Лес сосновый	ворона	сосна	15	24.06	1+
2013	Лес елово-сосновый	ворона	сосна	15	24.06	3
2013	Лесопарковая зона	сорока	вяз мелколистный	6	24.06	2
2013	Лесопарковая зона	грач	сосна	17	02.07	2
2015	Лесопарковая зона	грач	сосна	17	25.06	4+
2015	Городская застройка	ворона	сосна	18	25.06	5+

Примечание: знак «-» обозначает отсутствие сведений.

Связь численности с обилием мелких млекопитающих. В результате отловов выявлено присутствие 8 видов, принадлежащих к двум отрядам (*Soricomorpha* и *Rodentia*): обыкновенная бурозубка (*Sorex araneus*), обыкновенная полевка (*Microtus arvalis*), пашенная полевка (*Microtus agrestis*), полевка-экономка (*Microtus oeconomus*),

рыжая полевка (*Myodes glareolus*), малая лесная мышь (*Sylvaemus uralensis*), полевая мышь (*Apodemus agrarius*) и серая крыса (*Rattus norvegicus*). Еще один вид — домовая мышь (*Mus musculus*) — обнаружен при анализе погадок ушастой совы, но в отловах он не представлен. Фактические результаты отловов приводятся ниже (табл. 5).

Таблица 5. Относительное обилие мелких млекопитающих (количество особей/100 ловушко-суток) на модельном участке в 2007—2015 гг.

Название вида или показателя	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>Sorex araneus</i>	1,1	-	0,6	-	-	1,3	0,6	0,6	1,1
<i>Microtus arvalis</i>	4	2	0,7	2,7	-	-	1,7	-	1,1
<i>Microtus agrestis</i>	-	-	-	-	1,3	-	0,6	-	0,6
<i>Microtus oeconomus</i>	-	-	-	1,3	2,7	-	0,6	0,6	-
<i>Myodes glareolus</i>	2,3	16,7	2	2,7	2,7	1,3	2,9	0,6	6,3
<i>Sylvaemus uralensis</i>	1,7	1,3	2,7	1,3	-	1,3	1,1	1,7	4

Название вида или показателя	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>Apodemus agrarius</i>	0,6	-	-	-	-	-	-	-	2,9
<i>Rattus norvegicus</i>	-	-	-	-	-	-	0,6	-	-
Количество видов	5	3	4	4	3	3	7	4	6
Количество ловушко-суток	175	150	150	75	75	75	175	175	175

Суммарное обилие мелких млекопитающих, их видовое разнообразие и доля каждого вида в отловах варьировали по годам (рис. 2). Выявлена положительная связь численности территориальных пар ушастых сов с обилием грызунов ($r_s = 0,86$; $p < 0,05$) и мелких млекопитающих в целом ($r_s = 0,90$; $p < 0,05$). Обнаружена высокая корреляция с относительной численностью рыжей полевки ($r_s = 0,81$; $p < 0,05$) — единственного вида,

который неизменно присутствовал в отловах во все годы и являлся доминирующим на стационаре. Статистически значимая корреляция с относительной численностью представителей рода *Microtus* ($r_s = 0,74$; $p < 0,05$) наблюдается только, если не принимать во внимание сведения за 2008 г., в который показатели численности сов и суммарного обилия их потенциальных жертв были пиковыми.

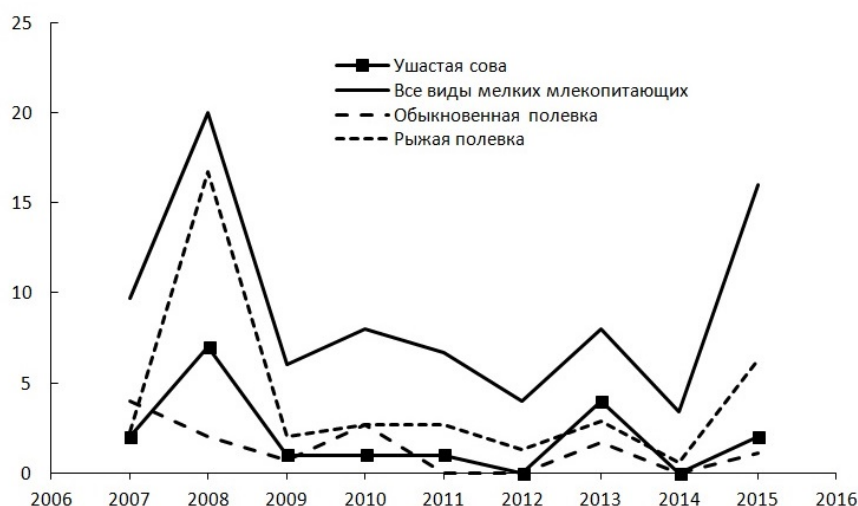


Рис. 2. Численность ушастой совы (количество пар) и обилие мелких млекопитающих (количество особей/100 ловушко-суток) на модельном участке в 2007—2015 гг.

В большинстве районов Европы главный объект питания ушастой совы — обыкновенные полёвки [10]. Для агроландшафтов северного Подмосковья показано, что ушастые совы ориентированы не столько на общее обилие потенциальных жертв, сколько на обилие (или на наличие) представителей рода *Microtus*, и приступают к гнездованию только в сезоны с достаточным обилием обыкновенной полевки [2]. На модельном участке в г. Дубна совы также гнездились только в годы, когда в отловах были представители рода *Microtus* и, в частности обыкновенные полевки.

Поскольку численность мелких млекопитающих может различаться в разных местах, интересно сравнение результатов, полученных нами на исследуемом модельном участке, и результатов, полученных на модельном участке «Апсарёвское урочище» в заказнике «Журавлиная родина» в 2007 и 2008 гг. [2; 9]. Оба участка расположены на территории северного Подмосковья.

Как было указано выше, в 2007 и 2008 гг. на модельном участке численность ушастых сов составила соответственно 2 и 7 пар на площади 10,2 км². Аналогичные показатели на участке «Апсарёвское урочище» составили 41 и 5 пар на площади примерно 48—50 км²

[2; 9]. Наибольшие показатели в обоих случаях соответствуют пикам численности сов на этих территориях за последнее десятилетие.

В 2007 и 2008 гг. относительное обилие обыкновенной полевки в г. Дубна составило 4,0 и 2,0 особи на 100 ловушко-суток, в то время, как на участке «Апсарёвское урочище» обилие вида в 2007 г. составило 7,2 особи на 100 ловушко-суток [2], а в 2008 г. представителей серых полевков отмечено не было. И если роль обилия обыкновенной полевки в агроландшафтах Апсарёвского урочища ($r_s = 0,88$; $p = 0,019$) оказывает очень значительное влияние [2], то для модельной территории в г. Дубна зависимость не значима.

Таким образом, для двух территорий, находящихся на расстоянии всего в 30 км друг от друга, обнаружены существенные различия как в динамике численности ушастых сов, так и в динамике численности их жертв. Так, в 2008 г. в агроландшафтах (участок «Апсарёвское урочище») наблюдалась депрессия численности фактически всех видов мелких млекопитающих как в луговых, так и в лесных сообществах. В небольшом числе отмечена только малая лесная мышь (по сообщению А.В. Шарикова). На модельной территории в г. Дубна подобного не наблюдалось, хотя видовое богатство в отловах в этот год снизилось до трех видов, при этом доля *M. glareolus* в отловах составила 83,3 %. Несмотря на то, что рыжие полевки не являются предпочтительными объектами охоты ушастых сов, пики численности этих видов в 2008 г. совпали.

Связь питания с обилием мелких млекопитающих. Анализ небольшого количества погадок, собранных за период исследований (в 2007, 2008, 2009 и 2013 гг.) показывает, что значимой частью рациона ушастой совы помимо обыкновенной полевки является *M. glareolus*. В частности, в 47 собранных погадках (содержащих фрагменты скелета 60 млекопитающих и одной птицы) обнаружены преимущественно рыжая (49 %) и обыкновенная (34 %) полевки. Существенно реже встречаются останки обыкновенной бурозубки, пашенной полевки, полевки-экономки, а также полевой, лесной и домовый мышей. В погадках, собранных непосредственно в 2008 г. ($n = 27$) останки рыжей и обыкновенной полевки составили 53 % и 30 % соответственно, а доля всех представителей рода *Microtus* — 37 %. Таким образом,

рыжие полевки составляют примерно половину рациона ушастых сов. При этом их доля в населения мелких млекопитающих исследуемой территории достаточно велика (не менее 1/3) даже в годы с относительно невысоким ее обилием на стационаре (рис. 3).

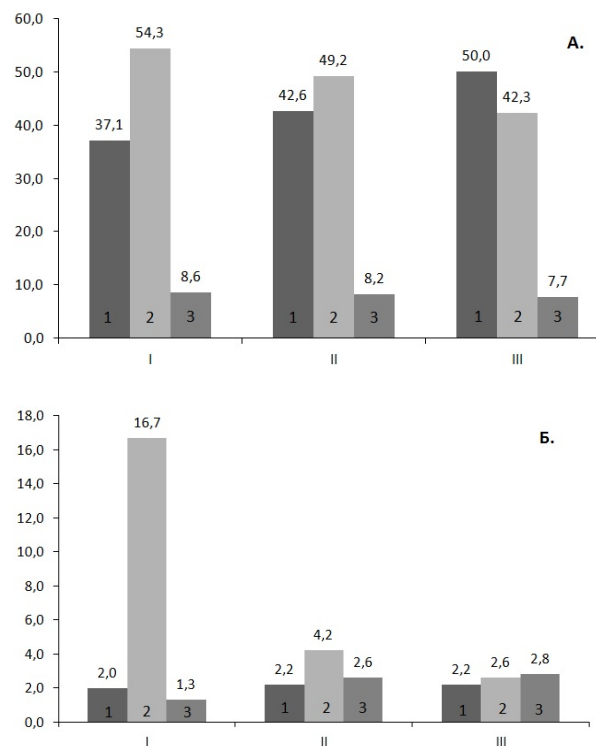


Рис. 3. Доля некоторых представителей мелких млекопитающих (%) в питании ушастых сов (А) и их относительное обилие (количество особей/100 ловушко-суток) на модельном участке (Б): I — в 2008 г.; II — в среднем на стационаре; III — в среднем на стационаре, без учета 2008 г.; 1 — полевки рода *Microtus*; 2 — *M. Glareolus*; 3 — другие виды мелких млекопитающих (мыши и землеройки)

Доля представителей рода *Microtus* в питании сов также является существенной, но не настолько высокой, как в ряде других местообитаний. Так, на модельном участке «Апсарёвское урочище» обыкновенная полевка в питании сов неизменно доминирует. Например, доля этого вида в питании ушастой совы в 2003 и 2004 гг. составила 78,9—96,8 %, при этом доля полевки рода *Microtus* составляла до 100 % [12]. Для этого же участка в 2003—2007 гг. относительное обилие полевки рода *Microtus* варьировало в пределах от 0,15 — в 2005 г. до 13,29 ос./100 л-с. — в 2007 г., а рыжие полевки были малочисленными (0,06—0,09 ос./100 л-с.) и встречались в отловах не ежегодно [2].

На основании изложенного выше, мы полагаем, что увеличение в рационе сов доли рыжих полевок (особенно в 2008 г.) связано с их высоким обилием по сравнению с другими мелкими млекопитающими. Регулярная встречаемость этого вида как в лесных сообществах, так и на открытых участках свидетельствует о высокой вероятности их добычи птицами. Возможно, именно поэтому питание ушастых сов на исследуемой территории является преимущественно двухкомпонентным.

Таким образом, мы не отмечаем у ушастых сов выраженной смены пищевых предпочтений (птицы предпочитают добывать *M. arvalis*), но при этом рыжие полевки в городской среде могут выступать как значимый дополнительный источник корма. Высокую же численность птиц в черте города при одновременном ее снижении в агроландшафтах северного Подмосковья в данном случае можно рассматривать как своеобразный адаптивный ответ на локальные депрессии численности мелких млекопитающих в сообществах открытых пространств.

Библиографический список

1. Волков, С. В. Выбор местообитаний и динамика численности ушастой и болотной сов: влияние мышевидных грызунов / С.В. Волков [и др.] // Изучение и охрана хищных птиц Северной Евразии : матер. V междунар. конф. по хищным птицам Северной Евразии. — Иваново : Изд-во Ивановского гос. ун-та, 2008. — С. 76—78.
2. Волков, С. В. Влияние обилия мелких млекопитающих на выбор местообитаний и динамику численности ушастой (*Asio otus*) и болотной (*Asio flammus*) сов / С.В. Волков [и др.] // Зоол. журн. — 2009. — № 88. — С. 1248—1257.
3. Волков, С. В. Распределение и численность совообразных в Московской области / С.В. Волков [и др.] // Совы Северной Евразии. — Москва, 2005. — С. 163—186.
4. Воронцовский, В. И. Популяционная экология ушастой совы (*Asio otus*) в антропогенных ландшафтах Центральной России : автореф. дисс. — Москва, 1996. — 24 с.
5. Галушин, В. М. Роль хищных птиц в экосистемах // Итоги науки и техники. ВИ-НИТИ. Зоология позвоночных. — 1982. — № 11. — С. 158—236.
6. Константинов, В. М. Особенности экологии ушастой совы в антропогенных ландшафтах Центрального района Европейской части СССР / В.М. Константинов, В.А. Марголин, В.Г. Бабенко // Гнездовая жизнь птиц. — Пермь, 1982. — С. 121—132.
7. Контрорщиков, В. В. Птицы Журавлиной родины и окрестностей: распространение и численность / В.В. Контрорщиков [и др.] // Вестник Журавлиной Родины. — Вып. 2. — Москва : Голос, 2014. — С. 5—170.
8. Наумов, Р. Л. Организация и методы учета птиц и вредных грызунов / Р.Л. Наумов. — Москва : Изд-во АН СССР, 1963. — 137 с.
9. Никитина, Л. Д. Влияние трофических и метеорологических факторов на динамику численности ушастой и болотной сов / Л.Д. Никитина, А.В. Шариков, С.В. Волков // XIV Международная орнитологическая конференция Северной Евразии. — 2015. — Т. 1. — С. 362—364.
10. Приклонский, С. Г. Ушастая сова / С.Г. Приклонский, В.П. Иванчев // Птицы России и сопредельных регионов: Рябкообразные, Голубеобразные, Кукушкообразные, Совеобразные. — Москва, 1993. — С. 302—313.
11. Шариков, А. В. Особенности взаимоотношений ушастой совы *Asio otus* и врановых птиц в гнездовой период // Русский орнитологический журнал. Экспресс-выпуск. — 2012. — Т. 21, № 789. — С. 2085—2087.
12. Шариков, А. В. Образование агрегированных гнездовых поселений как одно из проявлений синантропизации ушастой совы (*Asio otus* L.) / А.В. Шариков [и др.] // Экология. — 2010. — № 1. — С. 47—53.
13. Шариков, А. В. Фенологические аспекты биологии ушастой и болотных сов в северном Подмоскowie / А.В. Шариков [и др.] // Хищные птицы в динамической среде третьего тысячелетия: состояние и перспективы. Труды VI Междунар. конф. по соколообразным и совам Северной Евразии. — Кривой Рог, 2012. — С. 431—433.
14. Korpimäki, E. Population dynamics of Fennoscandian owls in relation to wintering condition and between-year fluctuations of food // The ecology and conservation of European owls. — Peterborough, 1992. — С. 1—10.
15. Korpimäki, E. Numerical and functional responses of Kestrels, Short-eared Owls and Long-eared Owls to vole densities / E. Korpimäki, K. Norrdahl // Ecology. — 1991. — № 72. — С. 814—826.
16. Mikkola, H. Owls of Europe / H. Mikkola. — London, 1983. — 397 p.

Поступила в редакцию
25.03.2016

УДК 504.75.05/06+621.311

Ю. П. Чернов, Т. А. Вербицкая**Особенности обоснования санитарно-защитной зоны для ТЭЦ**

Рассматриваются методические вопросы, возникающие при обосновании санитарно-защитных зон предприятий теплоэнергетики, отражены различные аспекты проектирования санитарно-защитных зон, особое внимание уделено оценке рисков для здоровья населения от воздействия выбросов предприятия как в части обоснования необходимости её проведения, так и методических особенностей проведения расчетов.

Ключевые слова: экология, санитарно-защитная зона, риск для здоровья, выброс в атмосферу, рассеивание загрязняющих веществ.

Об авторах

Чернов Юрий Петрович — кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и природопользования, заведующий методическим кабинетом филиала «Угреша» Государственного университета «Дубна».

Вербицкая Татьяна Андреевна — инженер-эколог ТЭЦ-9 «Мосэнерго», г. Москва.

В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [5] ориентировочные величины размеров санитарно-защитных зон (СЗЗ) для предприятий, деятельность которых связана с производством электрической и тепловой энергии при сжигании минерального топлива, устанавливаются в зависимости от классов опасности предприятий по санитарной классификации:

— класс I — с санитарно-защитной зоной 1000 м для тепловых электростанций (ТЭС) с эквивалентной электрической мощностью 600 мВт и выше, использующих в качестве топлива уголь и мазут;

— класс II — с санитарно-защитной зоной 500 м для тепловых электростанций (ТЭС) с эквивалентной электрической мощностью 600 мВт и выше, работающих на газовом и газо-мазутном топливе, а также ТЭЦ и районные котельные тепловой мощностью 200 Гкал и выше, работающие на угольном и мазутном топливе;

— класс III — с санитарно-защитной зоной 300 м для ТЭЦ и районных котельных тепловой мощностью 200 Гкал и выше, работающих на газовом и газомазутном топливе (последний — как резервный).

Кроме того, в соответствии с требованием СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 размер СЗЗ должен обеспечивать уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух

(химического, биологического, физического) до значений, установленных гигиеническими нормативами, а для предприятий I и II класса опасности — как до значений, установленных гигиеническими нормативами, так и до величин приемлемого риска для здоровья населения.

Наибольшее распространение в настоящее время имеют предприятия теплоэнергетики имеющие эквивалентную электрическую мощность ниже 600 мВт и использующие в качестве основного топлива природный газ, а в качестве резервного топлива — мазут. При обосновании размера СЗЗ для таких предприятий (ТЭС, ТЭЦ, районных котельных), в соответствии с СанПиН, нет необходимости проводить расчеты по оценке риска для здоровья населения при воздействии его выбросов. Таким образом, единственным критерием безопасности предприятий III, IV и V класса опасности сегодня является достижение снижения уровня воздействия по всем факторам за пределами санитарно-защитной зоны до требуемых гигиенических нормативов, в качестве которых для оценки уровня воздействия на атмосферный воздух используются максимальные разовые ПДК. Однако сложившаяся система управления загрязнением атмосферного воздуха не может гарантировать полную безопасность для здоровья населения и правильное определение приоритетов в действиях, направленных на предотвращение реальной опасности. В этой связи представ-

ляется важным рассмотреть некоторые вопросы, которые возникают при обосновании СЗЗ для ТЭЦ, работающих на газовом и мазутном топливе.

Один из первых вопросов при проектировании касается необходимости нормирования выбросов при использовании резервного топлива — мазута. Для каждого конкретного предприятия нужно выяснить основные мотивы использования резервного топлива — мазута. Если он используется при неких аварийных ситуациях, связанных, например, с перебоями в подачи основного топлива — природного газа, то в соответствии с [1] выбросы при работе котлов можно рассматривать как аварийные, и они не подлежат нормированию. В то же время устанавливаются нормативы на выбросы при периодической проверке работоспособности котлоагрегатов, работающих на мазуте. Если же использование резервного топлива не связано с аварийными ситуациями, а обусловлено производственным регламентом, то в данном случае выбросы при использовании мазута однозначно нормируются.

Важным этапом разработки проекта обоснования СЗЗ является составление инвентаризации источников выбросов, в рамках которого необходимо выяснить, какие источники работают на природном газе, а какие на мазуте. Необходимо объективно определить нестационарность выбросов. Таким образом, большое значение имеет достоверное установление мощности выбросов и валового выброса при использовании как основного топлива — природного газа, так и резервного — мазута.

На основании опыта, связанного с проектированием СЗЗ для ТЭЦ, работающих на природном газе и мазуте в качестве резервного топлива, можно заключить, что уровень воздействия на атмосферный воздух, как правило, для всех веществ является допустимым на всей зоне влияния выбросов

предприятия. Ближким к критическому может быть уровень воздействия для группы суммации (мазутная зола, азота диоксид и оксид, сера диоксид), в которой основной вклад создаёт выброс мазутной золы теплоэлектростанций (в пересчете на ванадий). На рис. 1 представлены результаты расчета рассеивания для неё в виде изолиний, из которого видно, что уровень воздействия на атмосферный воздух не превышает 0,9 ПДК.

Отдельно следует рассмотреть вопрос выбора размера площадки для проведения расчетов рассеивания. Максимальные значения концентраций вредных веществ для ТЭЦ с тепловой мощностью 575 Гкал/ч при высоте источников 63—72 м наблюдаются по результатам расчетов рассеивания на расстоянии 1,0—1,3 км. Таким образом, размер площадки должен значительно выходить за рамки СЗЗ, рекомендуемой СанПиН, и составлять минимум 2000 × 2000 м. Проведение расчета рассеивания в границах площадки меньшего размера может дать заниженные результаты воздействия на атмосферный воздух. Из рис. 1 видно, что на ближайшей жилой застройке уровень воздействия для группы суммации не превышает 0,2 ПДК.

Результаты оценки показали, что при хроническом ингаляционном воздействии выбросов ТЭЦ, работающей на природном газе и использующей в качестве резервного топлива мазут, коэффициент опасности HQ для индивидуальных веществ и индекс опасности HI при комбинированном воздействии химических соединений с односторонним токсическим действием не превышает 1, что характеризует риск для здоровья населения по существующей классификации как низкий, т.е. является допустимым. В табл. 1 представлены значения индексов опасности при воздействии на органы и системы.

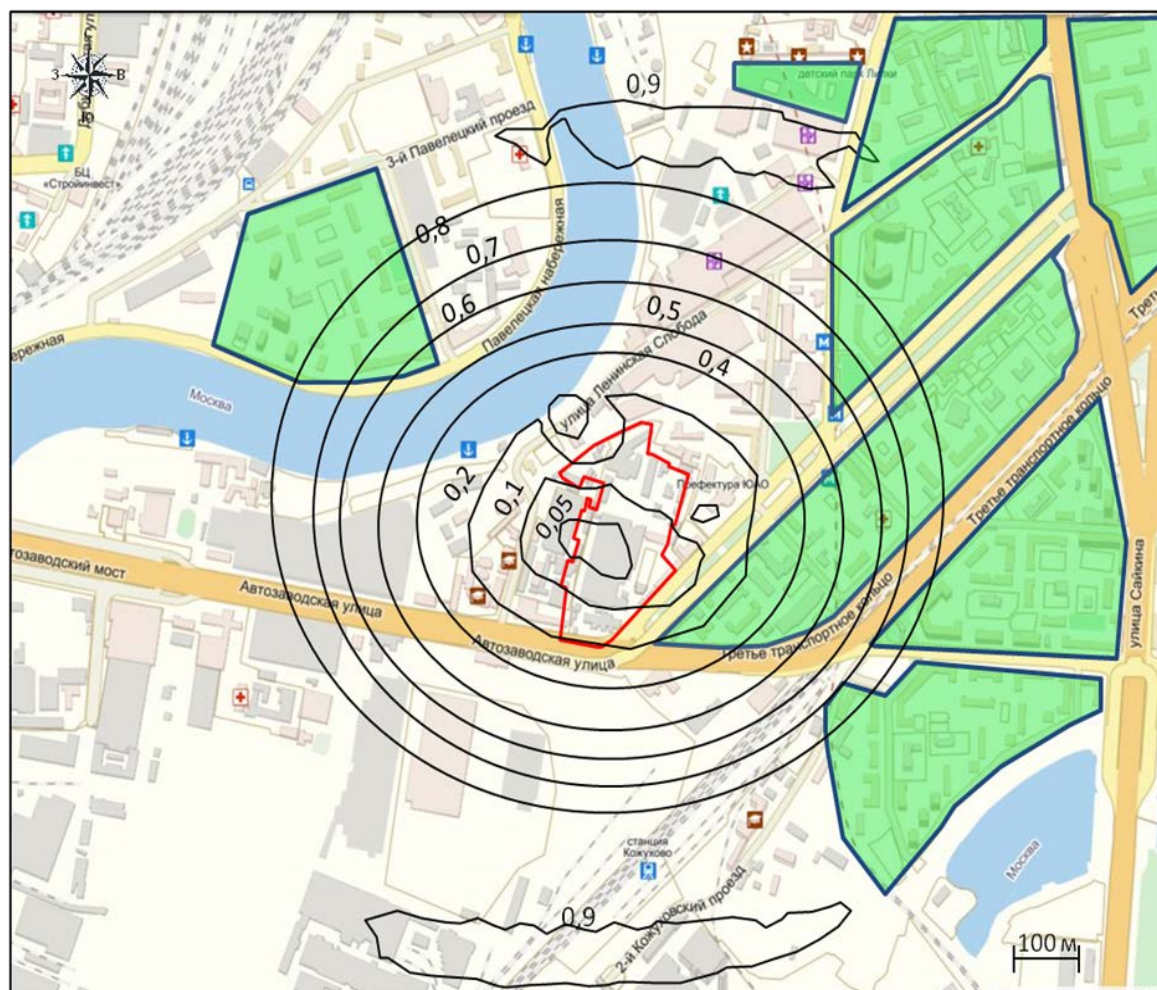


Рис. 1. Уровни загрязнения в долях ПДК для группы суммации (мазутная зола, азота диоксид и оксид, сера диоксид), серым цветом показаны жилые территории

Таблица 1. Результаты расчета значений индексов опасности

Органы и системы	Индекс опасности HI		
	При хроническом воздействии	При остром воздействии	
		При работе на природном газе	С использованием резервного топлива — мазута
Органы дыхания	0,95	0,19	3,87
Центральная нервная система	< 0,01	0,05	0,07
Развитие	0,9	0,01	0,01
Кровь	0,04	0,19	0,22
Печень	0,64	—	—

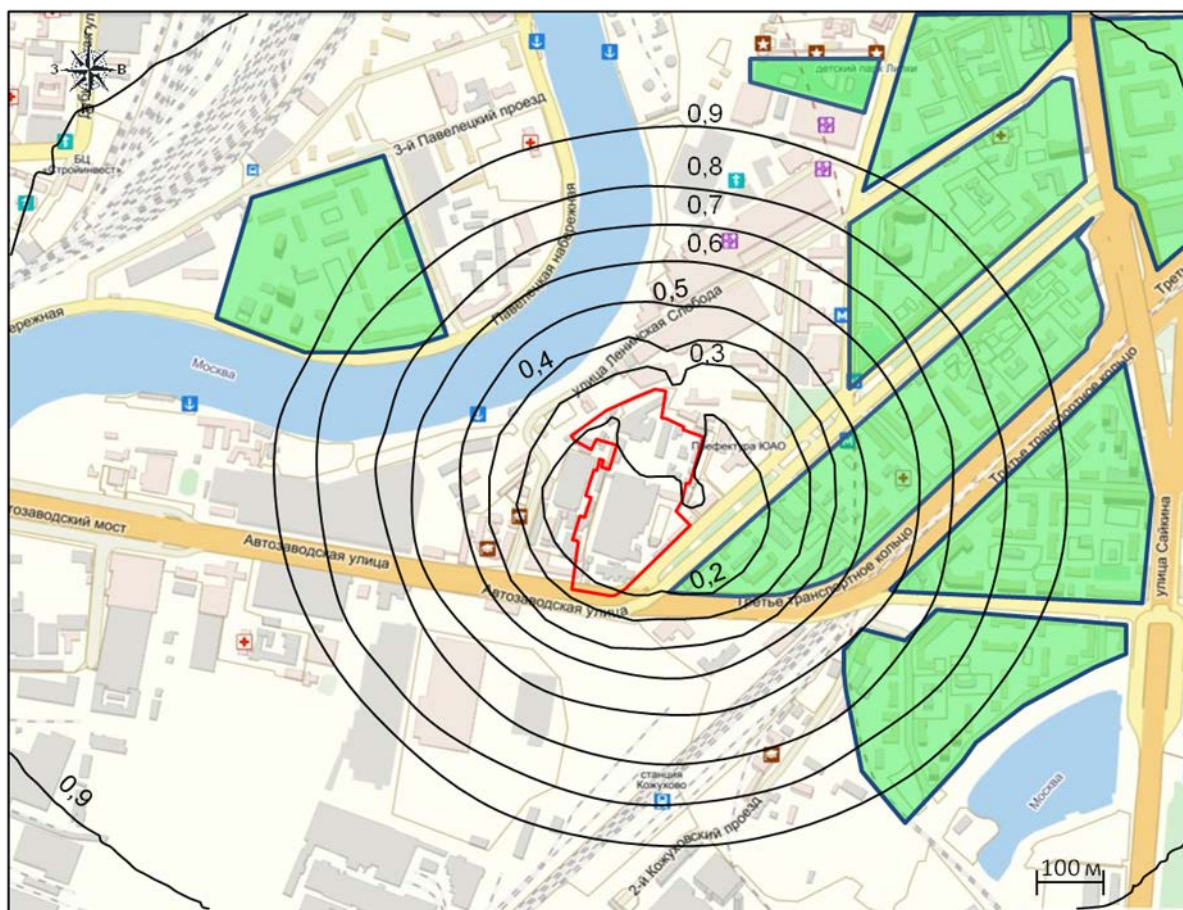


Рис. 2. Уровни индекса опасности HI при хроническом воздействии на органы дыхания

Наибольший индекс опасности наблюдается при хроническом воздействии на органы дыхания. На рис. 2 показана карта распределения индекса опасности в зоне влияния выбросов предприятия при воздействии на органы дыхания.

Другая картина имеет место при остром воздействии выбросов предприятия, на котором в качестве резервного топлива используется мазут. Значения индексов опасности для веществ с односторонним токсическим действием при остром воздействии представлены в табл. 1. На рис. 3

представлены изолинии индексов опасности при остром воздействии на органы дыхания. Полученные результаты свидетельствуют о среднем уровне риска в соответствии с принятыми количественными критериями их классификации (индекс опасности равен 3,87), т.е. риск приемлем для профессиональных групп и неприемлем для населения в целом. Появление такого риска требует разработки и проведения плановых оздоровительных мероприятий в условиях населенных мест.

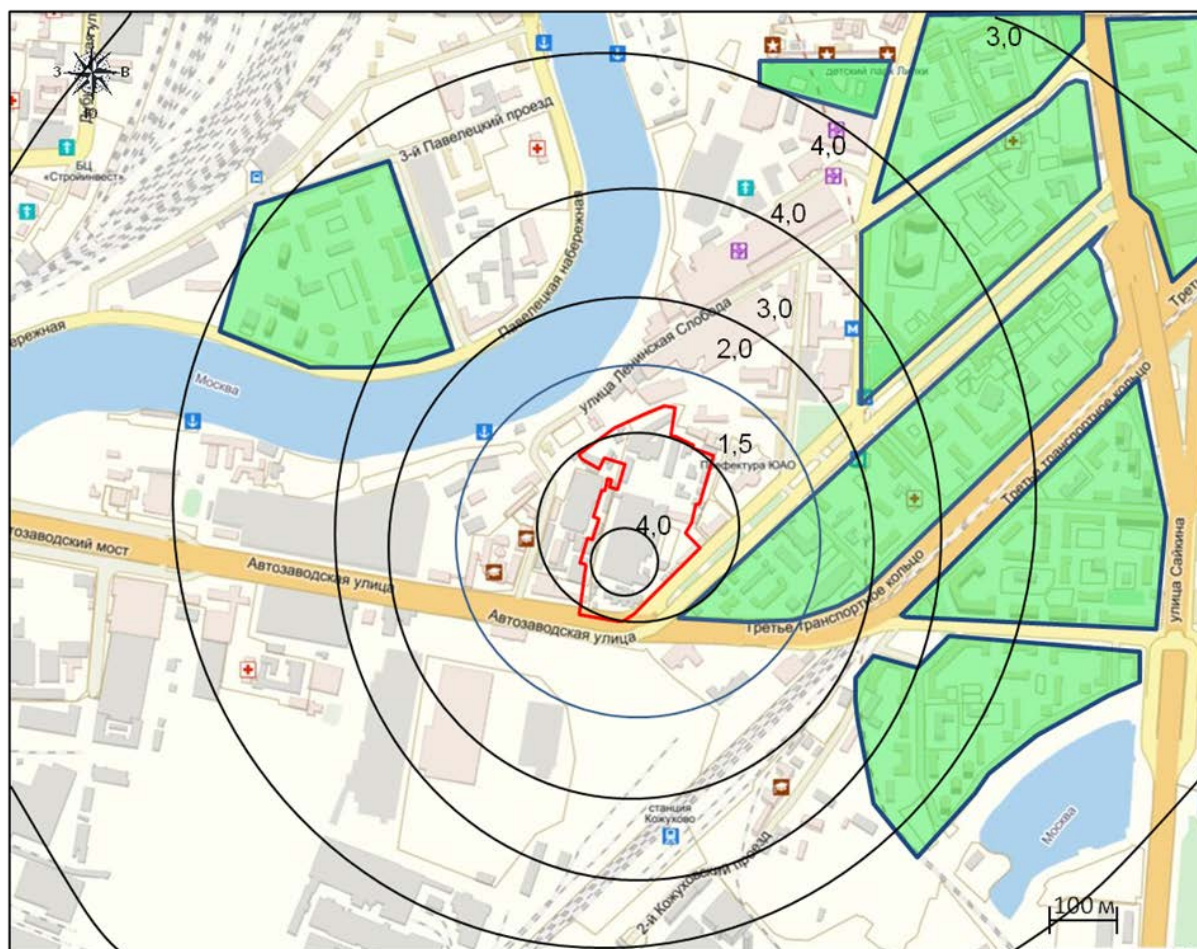


Рис. 3. Уровни индекса опасности HI при остром воздействии на органы дыхания

Среди выбрасываемых на предприятии веществ 3 вещества обладают канцерогенным эффектом: сажа, бенз(а)пирен и гидразин гидрат. Суммарный индивидуальный канцерогенный риск при ингаляционном поступлении веществ в результате хронических воздействий составляет $8,5 \cdot 10^{-6}$, что соответствует низкому уровню риска, в соответствии с классификацией уровней рисков [4].

Проведенная оценка риска для населения при воздействии выбрасываемых веществ в результате деятельности одной из московских ТЭЦ показала, что канцерогенный и неканцерогенный риск при хроническом ингаляционном воздействии является допустимым, а острый ингаляционный риск — нет.

Таким образом, при использовании в качестве топлива природного газа размер санитарно-защитной зоны определяется только фактором шума, а при использовании резервного топлива достаточность размера санитарно-защитной зоны может быть обес-

печена только с помощью мероприятий по снижению выброса мазутной золы. Это возможно, например, с помощью оснащения энергетического котла золоуловителем, что повлечёт за собой общее снижение риска для здоровья населения.

В соответствии с требованиями [2; 5] с целью установления окончательного размера СЗЗ её расчетные границы должны быть подтверждены результатами натурных исследований атмосферного воздуха, измерениями уровня шума и оценками риска для здоровья населения. Принимая во внимание, что рассматриваемая ТЭЦ относится к промышленному предприятию III класса опасности, то количество натурных исследований приоритетных показателей за состоянием загрязнения атмосферного воздуха должно составлять не менее тридцати дней исследований на каждый ингредиент в отдельной расчетной точке.

Принимая во внимание сформулированные в [3] основополагающие принципы

оценки рисков здоровью, признанные на международном уровне, для большей полноты проведённого исследования было бы полезным запросить в учреждениях здравоохранения данные о состоянии здоровья населения в зоне влияния выбросов ТЭЦ и в целом по району для последующего их сопоставления с полученными результатами, но это является уже предметом дальнейших исследований.

Основным результатом проведённой работы является вывод о том, что, несмотря на то, что в [5] не содержатся требования производить оценку рисков для здоровья населения для предприятий III класса опасности, иногда всё-таки её выполнять весьма полезно, а в ряде случаев, когда предприятие находится в районе со сложившейся жилой застройкой, где присутствуют зоны отдыха, санатории, спортивные сооружения, образовательные, детские, лечебно-профилактические и оздоровительные учреждения, можно сказать, что необходимо. Это, прежде всего, обусловлено тем, что СанПиН носит рекомендательный характер, а окончательное принятие решений в отношении разработки программы по оценке уровней воздействия на здоровье населения, установление средств и способов

его защиты должны определяться в каждом конкретном случае сложившейся ситуацией и интересами населения.

Библиографический список

1. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов ЗВ в атмосферный воздух (доп. и перераб., введ. в действие письмом Минприроды РФ №05-12-47/4521 от 29.03.2012 г.). — Санкт-Петербург : НИИ «Атмосфера», 2012.

2. О разъяснении отдельных положений СанПин 2.2.1/2.1.1.1200-03 (новая редакция). Письмо Роспотребнадзора от 24 августа 2012 г. № 01/9550-12-32.

3. Рахманин, Ю. А. Современные проблемы оценки риска воздействия факторов окружающей среды на здоровье населения и пути ее совершенствования / Ю.А. Рахманин [и др.] // Анализ риска здоровью. — 2015. — № 2. — С. 4—11.

4. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04. Утв. Глав. гос. санитарным врачом РФ 05.03.2004 г.

5. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03.

*Поступила в редакцию
25.03.2016*

УДК 553:550.835.8:549.08

О. А. Якушина, Д. А. Кожевников, М. С. Хозяинов

Рентгеновская микротомография в современном комплексе лабораторных методов исследования геообъектов

В последние годы активно расширяется применение вычислительной рентгеновской микротомографии (РТ) для исследования геообъектов. Обсуждаются возможности использования метода в комплексе современных физических методов изучения минерального сырья. Проведен анализ возможностей МРТ для исследования керна нефтегазовых скважин. Авторы выделили три основные задачи, решаемые методом РТ, и сформулированы требования к приборам: качественная оценка полноразмерных кернов, изучение количественных характеристик на уровне микроструктуры и исследования в процессе моделирования вытеснения флюида при различных термобарических условиях.

Ключевые слова: рентгеновская томография, СТ-сканеры, лабораторные методы, пористая среда, петрофизические свойства, минеральный состав, морфоструктурные характеристики.

Об авторах

Якушина Ольга Александровна — доктор технических наук, профессор кафедры общей и прикладной геофизики Государственного университета «Дубна».

Кожевников Дмитрий Александрович — аспирант кафедры общей и прикладной геофизики Государственного университета «Дубна».

Хозяинов Михаил Самойлович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления проектами Государственного университета «Дубна».

Задача лабораторных исследований геовещества — горных пород, руд, минералов и их агрегатов, техногенного минерального сырья — получить наиболее полные, объективные, достоверные данные: петрофизические, текстурно-структурные, минеральный состав, на основании которых дается прогноз качества сырья, оценка запасов, перспективности применения способов и технологий добычи и переработки. Очевидна привлекательность метода рентгеновской вычислительной томографии для исследования геообъектов как неразрушающего метода исследований. В настоящее время в мире активно проводятся конференции по вычислительной томографии, в которых отдельно выделяются секции с докладами по изучению геообъектов: *ICTMS* (<http://www.ictms.ugent.be/>); Практическая микротомография (<http://microctconf.com/>), на Геологическом конгрессе — 2016 в ЮАР заявлена секция РТ.

Применять МРТ как инструмент исследования горных пород и руд в России

было предложено и начато в 1990-х гг. [2]. Для этого была специально сконструирована отечественная аппаратура — микротомограф ВТ-50-1-«Геотом» (ООО «Проминтро»). В 1990-е гг. крупные зарубежные нефтяные компании начали достаточно широко использовать томографию для сканирования керна горных пород как рутинный денситометрический метод [3—5], используя преимущественно медицинские томографы. В настоящее время ряд исследовательских лабораторий отечественного нефтегазового сектора (ОАО «Лукойл», ОАО «ТомскНИПИнефть», ОАО «Тверьгеофизика», ОАО СИББУРМАШ, ОАО ВНИИ ГАЗ, МГУ им. М.В. Ломоносова, РГУНГ им. И.М. Губкина, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Пермский национальный исследовательский университет и др.) оснащен рентгеновскими томографами разных производителей и марок, которые используются, главным образом, как инструмент выявления наиболее информативных участков керна для дальнейших традиционных исследований; паспортизации и цифровой архивизации керна, определения петрофизических параметров: пористости, трещиноватости, кавернозности; для визуа-

лизации неоднородностей, выделения в колонке керна характерных участков для специальных анализов.

В геонауках присутствуют нефтегазовая геология, геология рудных и нерудных полезных ископаемых. Для нефтегазовой геологии (как и в исследовании почв) важно прежде всего определить характеристики пустотного пространства, в геологии твердых полезных ископаемых — минеральный состав, текстуру и структуру пород. По мнению авторов, в обоих случаях можно выделить три основные задачи исследования геовещества, решаемые методом РТ [3]: качественная оценка полноразмерных кернов или кусков, обломков породы, изучение количественных характеристик на уровне микроструктуры и исследования в процессе моделирования различных термобарических условий.

Изображения томограмм визуализируют характер распределения фаз и пустотное пространство в тонком плоском слое исследуемого объекта, по которым устанавливают их размеры, т.е. позволяют получать данные о морфоструктурных особенностях, о пустотном пространстве горных пород (пористости, трещиноватости), по которым можно прогнозировать свойства сырья и его поведение в процессах переработки.

Важными преимуществами метода РТ являются неdestructивность, отсутствие пробоподготовки, естественное состояние слагающих фаз; возможность построения 3D моделей — образов внутренней сферы исследуемого объекта; разделение минералов с близкими оптическими характеристиками. При петрофизическом, минералогическом изучении геовещества возникают определенные трудности из-за сложности полиминерального состава изучаемых объектов, присутствия в них тонкодисперсных и аморфных агрегатов, неоднородности зерен промышленно ценных минералов, близости физических свойств, например оптических констант минералов. Наличие таких слабо окристаллизованных «рентгеноаморфных» фаз не является ограничением РТ анализа.

Метод исследования

Существо метода рентгеновской (вычислительной) томографии заключается в реконструкции (восстановлении) и визуализации пространственного распределения величины линейного коэффициента ослабления ЛКО (μ , см^{-1}) рентгеновского излучения

в плоском слое ИО в результате компьютерной математической обработки серии теневых проекций, получаемых при просвечивании ИО тонким рентгеновским лучом по различным направлениям вдоль исследуемого слоя.

Известно, что величина линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения ЛКО μ , см^{-1} определяется химическим составом и плотностью вещества для данной энергии гамма-излучения вдоль выбранного направления в плоскости сечения: $\mu = \mu_m \cdot \rho$, определяемая через массовый коэффициент ослабления гамма-излучения рассматриваемого вещества при той же энергии ($\text{см}^2/\text{г}$) и физическую плотность вещества ($\text{г}/\text{см}^3$). Для фиксированной энергии гамма-излучения величина μ может быть вычислена по формуле:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho, \quad (1)$$

где μ_m — массовый коэффициент ослабления гамма-излучения рассматриваемого вещества при той же энергии, $\text{см}^2/\text{г}$; ρ — плотность вещества, $\text{г}/\text{см}^3$.

Для вещества сложного химического состава величина μ_m определяется:

$$\mu_m = \sum_i p_i \mu_{mi}, \quad (2)$$

где p_i — относительное весовое содержание в сложной среде i -го элемента, имеющего массовый коэффициент ослабления μ_{mi} .

Эффективность РТ анализа зависит как от характеристик прибора (источника рентгеновского излучения; вида, материала детектора; пространственного разрешения), так и алгоритмов расчета. Укажем, что более высокое пространственное разрешение обеспечивают приборы с микрофокусной рентгеновской трубкой — микротомографы.

Сегодня есть два методических подхода к анализу томографических изображений: первый — в оттенках серого по шкале Хаунсфилда (как в медицинских исследованиях), но интерпретация фазового состава в оттенках серого (по шкале HU) и посредством совмещения цветовых характеристик с данными электронной микроскопии (картирование минералов) не всегда однозначна. Второй — разработанная нами оригинальная методика диагностики элементов неоднородности (минеральных фаз) путем сопоставления отношений амплитуд ЛКО на томограмме (эксперимент) для фазы и образца сравне-

ния (как правило, алюминия, его плотность близка к таковой породообразующих силикатов и алюмосиликатов) с теоретически рассчитанными отношениями эффективных величин ЛКО [3]. Это позволяет сопоставлять измерения, проведенные при разных режимах съемки, для идентифицируемых фаз разных размеров, при меняющемся минеральном составе вмещающей среды. Известные данные о морфологии минеральных образований, их размерах, кристаллографических формах, другая априорная информация позволяют повысить надежность идентификации. Разработана схема РТ проведения анализа (рис. 1).

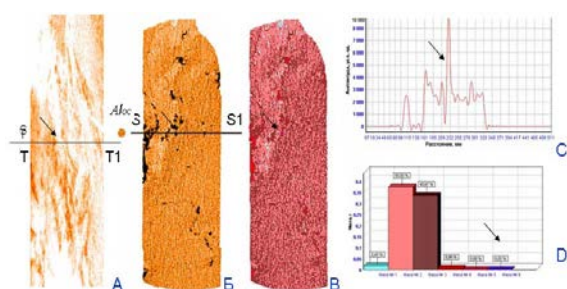


Рис. 1. РТ-анализ: А — рентрограмма; Б — томограмма по сечению $T-T1$ (OC-Al); В — выделение фаз с помощью специального ПО; С — профиль ЛКО по линии $S-S1$; D — фазы, в %

Приведем некоторые примеры МРТ исследования на рентгеновском микротомографе ВТ-50-1, условия эксперимента: средняя энергия нефльтрованного излучения ~ 100 кэВ, достаточная для просвечивания минеральных объектов, обеспечивается преобладание фотоэффекта при взаимодействии гамма-квантов с веществом, когда величина ЛКО зависит от атомного номера элемента, т.е. состава вещества. Условия съемки: микрофокусный рентгеновский источник РЕИС-150М, с электростатической и магнитной системами фокусировки электронного пучка; воздушное охлаждение мишени, рабочее напряжение рентгеновской трубки $U = 100$ кВ, ток накала $I = 2,9$ А; блок детекторов 8 каналов со сцинтилляторами CsJ(Na), веерная геометрия сканирования, шаг 3 мкм. Предел пространственного разрешения 5 мкм, диапазон значений томограммы в шкале условных единиц от -32767 до 32768 в десятичной системе счисления.

Для осадочных карбонатных марганцевых руд Тынинского месторождения методом РТ был решен технологический во-

прос: показано, что хотя в исходной руде имелось значительное содержание слоистых (глинистых) минералов, но с уменьшением крупности зерен различие в фазовом составе исходной и «мытой» руды нивелируется, и при размере 1 мм можно не применять операцию «отмывания» руды.

В начале лабораторных исследований руд Сейбинского узла по МРТ установлен характер взаимоотношения рудообразующих минералов: почти равномерная тонкая вкрапленность кварца и гидроксидов железа в рудном марганцевом агрегате, что показало о невозможность применения физических методов обогащения, характер взаимоотношения марганцевых фаз определил невозможность селективного разделения конкретных марганцевых минералов, учитывая близость их физических свойств. Визуально зерна рудных минералов всех классов крупности выглядели однородными, но РТ установила, что это пиролюзит-псиломелановые агрегаты — гидроксиды марганца: на поверхности зерен в результате окисления образуют тонкую оболочку. Эти особенности строения руд влияют на технологические свойства руды и качество продуктов — перспективно применять химические методы переработки.

При изучении титаномагнетитовых руд Пудожгорского месторождения РТ показала, что руда сформирована сложными тонковкрапленными агрегатами (размером 30—150 мкм, в среднем ~ 50 мкм), равномерно распределенными в алюмосиликатной матрице (рис. 2). На томограммах видно, что титаномагнетит является магнетит-ильменитовыми сростаниями с включениями нерудных минералов. В руде всех горизонтов присутствует не менее 3—4 рудных и 5—8 породообразующих минеральных фаз, выделяющихся по ЛКО. Томограммы демонстрируют, что титаномагнетит — это сложные магнетит-ильменитовые-ульвешпинелевые сростания, т.е. микроагрегат с включениями 3—4 фаз нерудных минералов. Содержание рудных и породообразующих минеральных фаз в каждом горизонте по данным РТ соответствовало определенному методом рентгенофазового анализа методом порошка. По данным РТ установлен массовый гранулярный состав руды: титаномагнетит преобладает в пределах относительно крупных фракций $-1,5...+0,5$ мм (рис. 3), что дает возможность предположить отсутствие его существенных потерь при обогащении в связи с трудноосуществимым и

нерентабельным извлечением тонких классов, покрытых нерудной «рубашкой».

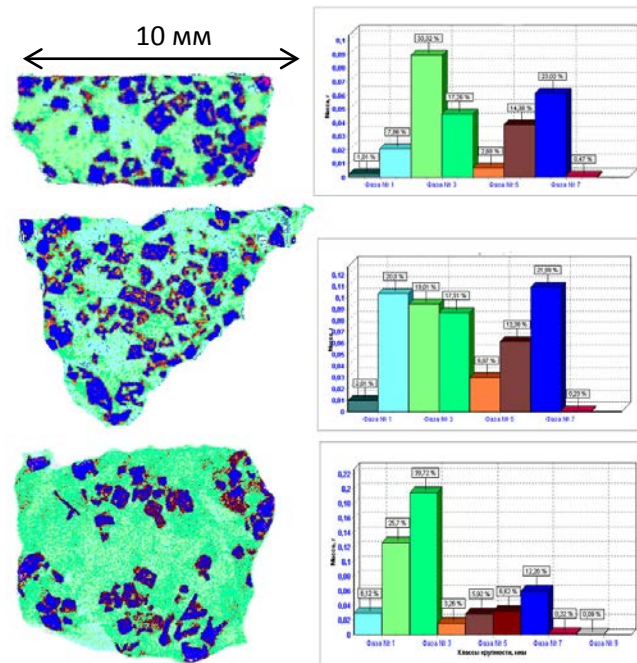


Рис. 2. РТ титаномagnetитовых руд, горизонт: 1 — надрудный; 2 — рудный; 3 — подрудный горизонты: А — томограмма; Б — обработка с помощью специального ПО

Надрудный горизонт						
Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мкм			Удлинение
			мин.	средн.	макс.	
титаномagnetит	13,01	0,790	0,030	0,189	0,834	1,49
Гранулярный состав						
Кл. крупн., мкм	Количественный Содержание, %	Массовый Содержание, %		Гистограмма		
- 2 + 1,5	0,00	0,00		[Гистограмма]		
- 1,5 + 1	2,20	43,68		[Гистограмма]		
- 1 + 0,5	7,14	38,78		[Гистограмма]		
- 0,5 + 0,2	12,09	14,29		[Гистограмма]		
- 0,2 + 0,1	9,71	2,11		[Гистограмма]		
- 0,1 + 0,074	4,45	0,59		[Гистограмма]		
- 0,074 + 0,044	17,56	0,32		[Гистограмма]		
- 0,044 + 0	46,84	0,22		[Гистограмма]		
Рудный горизонт						
Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мкм			Удлинение
			мин.	средн.	макс.	
титаномagnetит	28,34	0,72	30	312	2069	1,57
Гранулярный состав						
Кл. крупн., мкм	Количественный Содержание, %	Массовый Содержание, %		Гистограмма		
- 2 + 1,5	0,00	0,00		[Гистограмма]		
- 1,5 + 1	5,82	50,46		[Гистограмма]		
- 1 + 0,5	17,99	36,58		[Гистограмма]		
- 0,5 + 0,2	25,64	11,36		[Гистограмма]		
- 0,2 + 0,1	15,86	1,29		[Гистограмма]		
- 0,1 + 0,074	3,37	0,09		[Гистограмма]		
- 0,074 + 0,044	15,16	0,19		[Гистограмма]		
- 0,044 + 0	16,17	0,03		[Гистограмма]		
Подрудный горизонт						
Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мкм			Удлинение
			мин.	средн.	макс.	
титаномagnetит	10,25	0,81	20	115	2251	1,49
Гранулярный состав						
Кл. крупн., мкм	Количественный Содержание, %	Массовый Содержание, %		Гистограмма		
- 2 + 1,5	0,00	0,00		[Гистограмма]		
- 1,5 + 1	1,70	42,53		[Гистограмма]		
- 1 + 0,5	6,29	43,36		[Гистограмма]		
- 0,5 + 0,2	7,77	11,66		[Гистограмма]		
- 0,2 + 0,1	3,90	1,07		[Гистограмма]		
- 0,1 + 0,074	2,90	0,27		[Гистограмма]		
- 0,074 + 0,044	17,91	0,76		[Гистограмма]		
- 0,044 + 0	59,53	0,35		[Гистограмма]		

Рис. 3. Расчет морфоструктурных параметров титаномagnetитовых руд по данным мРТ: количественный (А) и массовый (Б) гранулярный состав титаномagnetита (на пробу)

Особое внимание сегодня обращено на техногенное сырье (шлаки, окатыши, хвосты металлургического передела) как потенциальный источник расширения минерально-сырьевой базы страны, а их вовлечение во вторичную переработку сократит техногенную нагрузку на окружающую среду. При лабораторных исследованиях надо учитывать особенности техногенного сырья — макроскопическая однородность, хотя они сформированы ультратонкими полиминеральными агрегатами; значительные содержания рентгеноаморфных фаз и пр.

С целью определения полноты извлечения полезных фаз металлов, были исследованы окомкованные хвосты (окатыши) обогащения колчеданных руд, предназначенные для закладки в отработанное пространство горных выработок с целью их рекультивации (рис. 4). Установлено, что на томограммах окатыши проявляют порошковатую, пятнистую текстуру и мелкористаллическую структуру, сформированы 5—6 минеральными фазами размером не более ~150 мкм. Основная масса их сформирована кварцем и тонкокристаллическим пиритом, в которой достаточно равномерно распределены кристаллы сфалерита и халькопирита размером 80—120 мкм, отмечаются пятни-

стые участки с мелкими кавернами, выполненными гипсом. В весьма незначительном количестве (< 0,02 %) установлены обособленные фазы размером 120x150 мкм, по величине ЛКО ($\alpha\text{э}/\text{Al}_{oc}$) ~15,0 — это металлическая медь (рис. 4—2). Поскольку остаточные содержания полезных минералов не превышают допустимых (т.е. они извлечены), присутствие токсичных минеральных фаз не выявлено, то окатыши могут использоваться для рекультивации.

В настоящее время в ОИЯИ (г. Дубна) ведутся работы по совершенствованию сенсорной системы (детектора) рентгеновского микротомографа *MARS*. Данный томограф имеет рабочее поле до 10 см, длина до 28 см (что позволяет исследовать полноразмерный керн). Важно, что исследуемый образец неподвижен, а вращается система источник — детектор. Это позволит проводить моделирование фильтрации флюида через образец в при различных температурах и давлениях. Разрабатываемый детектор на основе арсенида галлия позволит повысить эффективность измерений, а система детектирования в целом позволит также проводить определение энергии регистрируемого кванта.

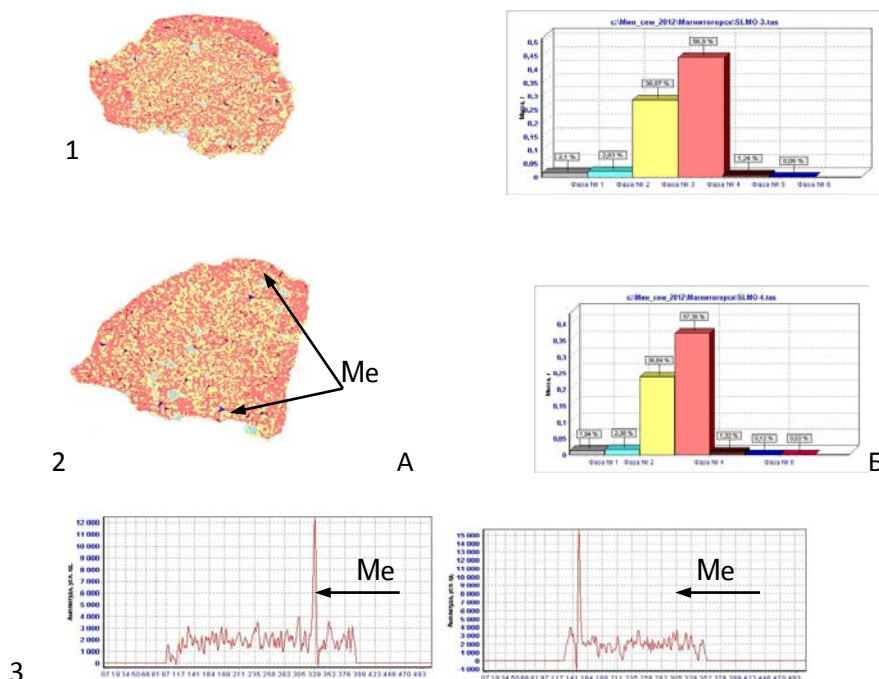


Рис. 4. Хвосты обогащения, μPT , томограммы (1,2) и графики амплитуды ЛКО через индивиды металла (3): слева направо микропоры серое, гипс голубое, кварц желтое, пирит лососевое, сфалерит коричневое, халькопирит синее, металл малиновое (Me)

Заключение

Горные породы и минералы оказались сложным объектом для исследования РТ, причины этого как в используемом немонохроматическом излучении, так и в сложном строении минеральных объектов: поликомпонентном и изменчивом реальном составе (изоморфизм, полиморфизм, микропримеси), микровключениях других минералов. Тем не менее, в последние годы разные группы исследователей за рубежом и в нашей стране ведут активные разработки в области применения метода рентгеновской томографии как лабораторного метода исследования руд и пород в геологии и смежных областях знаний [1; 6].

Библиографический список

1. Кожевников, Д. А. Рентгеновский томограф MAPS с детектором из арсенида галлия: новые возможности анализа керна нефтегазовых скважин / Д.А. Кожевников [и др.] // Матер. конф. «Практическая микротомография»

(Москва, 2—4 октября 2013 г.). — Москва : Почв. ин-т РАН, 2013. — С. 99—105.

2. Хозяинов, М. С. Использование рентгеновской микротомографии в прикладной минералогии / М.С. Хозяинов, А.К. Руб, Е.В. Козорезов // ДАН. — 1995. — № 4. — С. 516—519.

3. Хозяинов, М. С. Анализ возможностей рентгеновской томографии для петрофизических исследований керна нефтегазовых скважин / М.С. Хозяинов, О.А. Якушина // Каротажник. — 2014. — № 2. — С. 107—121.

4. Akin, S. Computed tomography in petroleum engineering research / S. Akin, A.R. Kovscek // Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences ; F. Mees, R. Swennen, M. Geet, P. Jacobs (Eds.). — Special Publication, Geological Society, London. — 2003. — V. 215. — P. 23—38.

5. Carlson, W. D. Three-dimensional imaging of earth and planetary materials // Earth and Planetary Science Letters. — 2006. — V. 249. — P. 133—147.

6. Veerle, C. High-resolution X-ray CT in geosciences: a review of the current technology and applications / C. Veerle, M. Boone // Earth-Science Reviews. Elsevier. — 2013. — V. 123. — P. 1—17.

Поступила в редакцию
25.03.2016

ABSTRACTS

Arkhipova H.V., Zhigalin A.D., Guseva I.S. Temporal variations of seismicity as an indicator of systemic seismogeodynamic development of Eastern Siberia and the Far East

Based on the data samples from the USGS catalog from 1973 to 2014 are calculated time series reflecting variations in earthquake activity within the regions of the Far East and Eastern Siberia. It turned out that the time course of earthquakes in these regions can be traced synchronization periods of peak activity, which is most pronounced for certain seismically active levels. Sync revealed evidence of the presence of systemic manifestations of the unity of the seismicity in the north-east of Eurasia. The findings are important for the medium-term forecast of seismic hazard and the timely adoption of measures for the prevention of natural and man-caused disasters.

Keywords: temporal variations in the number of earthquakes, seismic hazard, cascade development of natural and man-made processes.

Bortnovsky Z.V. Using of remote sensing data for thematic mapping of logging area

The paper has considered some aspects of detection of land cover features with help of remote sensing data. Results of thematic mapping for the territory has been transformed due to logging are presented.

Keywords: remote sensing data, thematic mapping, nature resource management.

Voronin K.A., Suyrakshina L.A., Gladyshev P.P., Yushankhai V.Yu. Electronic structure of hybrid organic-inorganic perovskites

Multiorbital model that describes universal electronic properties of a broad family of metal-halide perovskites ABX_3 , where $A = Cs, NH_4, CH_3NH_3$; $B=Sn, Pb$; $X=Cl, Br, I$ is formulated for the first time. Theoretical analysis of local electronic structure and electronic band spectrum of separate members of the family is performed.

Keywords: electronic structure, multiorbital model, photoelectric convertors, solar cells, hybrid organic-inorganic perovskites.

Datsko V.S. Evolution Equations Systems

It demonstrated that the description of the system – a linear oscillator in the free oscillation mode is now internally dissonantly. Using the equations of motion systems in the representation of Lagrange forces taking its dimension is equal to three. This leads to a change in the phase portrait of the system. It was shown that $D \neq \text{const}$ and $\text{div}(\dot{x}) \neq 0$.

Keywords: phase volume, Liouville's theorem, the oscillator, the equation of motion, representation of Lagrange.

Leonov A.P. To the analysis of digital precision positional automatic control systems

The simplified techniques is offered to calculate digital precision positional system parameters with power-width control. The conditions are analyzed under which this digital control system can be calculated as continuous in the first approximation. Given theoretical conclusions are illustrated by the example of particular precision positional digital control system analysis.

Key worlds: digital precision positional automatic control system, positioning accuracy, transient quality, digital speed measurement, the frequency Nyquist criterion for logarithmic characteristics.

Soloviev V.O. The Friedmann equation: yesterday, today, tomorrow

The story of discovering the equation for the Universe evolution by A. Friedmann in 1922 is briefly presented on occasion of 100 Years of General Relativity (GR). It is stressed that in this cosmological problem the geometrodynamical approach has been used for the first time, and the Hamiltonian constraint has been found. Some modern generalizations of GR and corresponding modifications of the Friedmann equation are also considered.

Keywords: general relativity, cosmology, hamiltonian formalism, history of physics, string theory, massive gravity.

Troyan Y.A., Rubchinskiy A.A. Conflict resolution in the markov chains

Parallel stochastic processes in some systems can be considered as simultaneous functioning of several Markovian chains with coinciding sets of states. The states are interpreted as undivided recourses, because at every moment no more than one chain can be in these states. The situation where several chains simultaneously require transition to the same state, forms the conflict. Conflict resolution consists in the choice of the chain that realizes the required transition, while the other chains, which also have required to reach the same state, are in waiting mode, i.e. they have lost time.

In the present work the new algorithm of such conflicts resolution is suggested; it can be used in cases where known method are inapplicable.

Keywords: queuing systems controlled Markov chains with rewards, Bernoulli process, and conflict resolution.

Khromov A.A. Biotopic distribution and the connection strength of long-eared owl (*Asio otus* L.) with an abundance of small mammals in urban landscapes of the north Moscow region

The article presents information on habitat distribution the long-eared owl (*Asio otus* L.) in Dubna from 2006 to 2015. Shows the relationship of population dynamics of species with an abundance of small mam-

mals. Shows the relationship of nutrition with an abundance of the genera *Microtus* and *Myodes*. Comparisons with neighbouring areas of research (model plot "Craneland").

Keywords: *Asio otus*, habitat distribution, population dynamics, biotic factors.

Chernov Yu.P., Verbitskaya T.A. Establishing sanitary protection areas for cogeneration facilities: feasibility and methodology

The article addresses methodological issues involved in environmental substantiation of sanitary protection areas in the power sector. The article reflects various aspects pertaining to the design and implementation of sanitary protection areas. Special attention is paid to the assessment of public health risks from exposure to industrial emissions, both in terms of validating the necessity of such an assessment and methodological particulars.

Keywords: ecology, sanitary protection area, health risks, air emissions, dispersion of pollutants.

Yakushina O.A., Kozhevnikov D.A., Khozyainov M.S. X-ray Computed Tomography as geomatter laboratory testing technique (in geosciences)

Implementing of X-ray Computed (micro)Tomography in the complex of laboratory physical methods as a routing one for morphostructural study when testing mineral raw materials, disperse ores. XCT combines the X-rays merits with the advantages of computer processing data. Its benefits are: fast-time, no sample preparation (crushing, thin sections, polishing surface). The data obtained result in phase segmentation, ore and rock-forming minerals separation, raw matters quality prognosis being technological mineralogy tasks.

Keywords: computed (micro)tomography, geomatter, petrophysical properties, porous medium, mineral composition, morphostructural characteristics.

**Порядок публикации статей в журнале
«Вестник Международного университета природы, общества и человека Дубна»**

Журнал издаётся с ноября 1996 года, является изданием университета «Дубна».

Основные рубрики, по которым принимаются оригинальные, актуальные, не публиковавшиеся ранее материалы:

- Естественные и технические науки.
- Экономика и управление.
- Социальные и гуманитарные науки.
- Информационные науки.
- Педагогика.

Осуществляется обязательная рассылка журнала в Книжную палату РФ, библиотеки других вузов страны, Московской области и города Дубна, авторам и др.

Содержание журналов с 2005 года представлено на сайте университета «Дубна».

К сотрудничеству приглашаются специалисты и исследователи в указанных областях, докторанты, аспиранты, преподаватели вуза.

Для публикации статьи необходимо представить в редакцию журнала:

— **материал** в электронном и печатном виде (текст в MS Word, рисунки в виде графических файлов — согласно Правилам оформления рукописей, действующим в университете «Дубна»), объёмом до 10 печатных страниц формата А4;

— оформленный бланк **«Передача авторского права и декларация об обязанности»** (см. приложение);

— **рецензию на статью** (одну внешнюю либо две внутренние);

— **индекс УДК** к статье;

— **аннотацию** к статье на русском и английском языках,

— **перевод на английский язык** названия статьи и фамилии, имени, отчества авторов;

— **ключевые слова** к статье — 5—6 слов или словосочетаний на русском и английском языках;

— **сведения об авторе(ах)** — полностью фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, место работы и должность; координаты: рабочий, мобильный телефон, адрес электронной почты;

— **пристатейный «Библиографический список»** — не менее пяти наименований.

Редакция может публиковать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точки зрения авторов. Авторы опубликованных статей несут ответственность за точность приведённых фактов, статистических данных, собственных имён и прочих сведений, а также за содержание материалов, не подлежащих открытой публикации.

Адрес редакции

141982, г. Дубна Московская обл.,

ул. Университетская, 19

Тел.: (+7 49621)6-60-89, 1355

E-mail: izdat@uni-dubna.ru



ВТОРАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРИРОДА, ОБЩЕСТВО, ЧЕЛОВЕК» 30 НОЯБРЯ - 2 ДЕКАБРЯ 2016 ГОДА

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем Вас принять участие в работе II Научно-практической конференции «Природа, общество, человек» государственного университета «Дубна», которая будет проходить с 30 ноября по 2 декабря 2016 года на территории университетского кампуса (Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, 19).

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- информационные технологии (руководитель секции – Е.Н. Черемисина, доктор технических наук, и.о. директора института системного анализа и управления);
- естественные науки (руководитель секции – О.А. Савватеева, кандидат биологических наук, и.о. декана факультета естественных и инженерных наук);
- социальные и гуманитарные науки (руководитель секции – Е.Н. Боклагов, кандидат философских наук, декан факультета социальных и гуманитарных наук);
- секция экономики и управления (руководитель секции – К.А. Степанов, кандидат экономических наук, декан факультета экономики и управления);
- секция инновационных разработок (руководитель секции – Ю.А. Крюков, кандидат технических наук, проректор по научной и инновационной деятельности).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Д.В. ФУРСАЕВ, доктор физико-математических наук, ректор Университета – председатель;
И.Б. НЕМЧЕНКО, кандидат химических наук, ученый секретарь – заместитель председателя;
Е.Н. БОКЛАГОВ, кандидат философских наук, декан факультета социальных и гуманитарных наук;
М.В. ЛИШИЛИН, руководитель лаборатории информационных систем в образовании;
О.А. САВВАТЕЕВА, кандидат биологических наук, и.о. декана факультета естественных и инженерных наук;
К.А. СТЕПАНОВ, кандидат экономических наук, декан факультета экономики и управления;
Е.Ю. ТИМАЛИНА, кандидат технических наук, руководитель издательства учебной литературы и учебных пособий;
Е.Н. ЧЕРЕМИСИНА, доктор технических наук, и.о. директора института системного анализа и управления;
Ж.В. ЩЕБЛЬКИНА, инженер научно-организационного отдела – секретарь.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

О.Л. КУЗНЕЦОВ, доктор технических наук, президент Университета – председатель;
Н.Г. БАГДАСАРЬЯН, доктор философских наук, заведующий кафедрой социальных и гуманитарных наук;
Е.Н. БОКЛАГОВ, кандидат философских наук, декан факультета социальных и гуманитарных наук;
П.П. ГЛАДЫШЕВ, доктор химических наук, профессор кафедры химии, новых технологий и материалов;
И.З. КАМАНИНА, кандидат биологических наук, и.о. заведующего кафедрой экологии и наук о Земле;
В.В. КОРЕНЬКОВ, доктор технических наук, заведующий кафедрой распределенных информационных вычислительных систем;
Ю.А. КРЮКОВ, кандидат технических наук, проректор по научной и инновационной деятельности;
С.А. ПАНОВ, доктор технических наук, заведующий кафедрой экономики;
Н.А. ПОЛОТНЯНКО, кандидат химических наук, доцент кафедры химии, новых технологий и материалов – ученый секретарь;
О.А. САВВАТЕЕВА, кандидат биологических наук, и.о. декана факультета естественных и инженерных наук;
Ю.С. САХАРОВ, доктор технических наук, заведующий кафедрой персональной электроники;
К.А. СТЕПАНОВ, кандидат экономических наук, декан факультета экономики и управления;
Е.Н. ЧЕРЕМИСИНА, доктор технических наук, и.о. директора института системного анализа и управления;
И.Б. ШАТУНОВСКИЙ, доктор филологических наук, профессор кафедры лингвистики.

Формат работы конференции предполагает 2 формы участия:

- устный доклад
- стендовый доклад

Для участия в конференции необходимо до **7 ноября** пройти регистрацию на странице конференции, прикрепив файл с тезисами доклада.

