

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ**

**Научный журнал**

**№ 4**

**Часть 2**



**ISSN 2413 – 0133**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА**

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ  
Андрианов А.Н., д.ф.-м.н., Москва, ИПМ РАН  
Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС  
Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ  
Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО  
Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН  
Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ  
Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ  
Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН  
Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН  
Донской В.И., ак. Крымской АН, Симферополь, Тавр. академия им. В.И. Вернадского  
Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНТУ  
Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС  
Казаков А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН  
Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана  
Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН  
Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины  
Силич В.А., д.т.н., Томск, ТПУ  
Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН  
Федотов А.М., чл.-корр. РАН, Новосибирск, ИВТ СО РАН  
Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН  
Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ

**ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА**

Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – главный редактор  
Макагонова Н.Н., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – выпускающий редактор  
Копайгородский А.Н., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – редактор  
Массель А.Г., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – редактор  
Иванов Р.А., к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН – дизайнер

**Рабочие контакты**

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН  
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130  
Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441

Массель Л.В.,  
e-mail: [massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru)

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Макагонова Н.Н.,  
e-mail: [mak@isem.irk.ru](mailto:mak@isem.irk.ru)

Сайт журнала и конференции ИМТ - <http://imt.isem.irk.ru>

---

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016

---

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН © Все права принадлежат авторам публикуемых статей.

Подписано в печать 28.11.2016 г. Тираж 100 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА</b>	<b>5</b>
<b>Математическое моделирование в научных исследованиях</b>	
<b>Мядзелец А.В., Черкашин А.К.</b> Учет региональной неоднородности в моделях инвестиционного процесса	<b>7</b>
<b>Гальперова Е.В.</b> Использование стенда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители	<b>17</b>
<b>Исаева О.С., Грузенко Е.А.</b> Эвристический метод построения модели функционирования командно-измерительной системы космического аппарата	<b>28</b>
<b>Елисеев С.В., Кашуба В.Б., Ковригина И.В., Кинаш Н.Ж.</b> Виртуальные рычажные связи: особенности механических колебательных систем	<b>38</b>
<b>Кашуба В.Б., Большаков Р.С., Кинаш Н.Ж.</b> О расширении набора параметров оценки динамического состояния механических колебательных систем	<b>50</b>
<b>Елисеев А.В., Каимов Е.В., Нгуен Дык Хуинь, Выонг Куанг Чык</b> Динамическое гашение колебаний в структуре системы возбуждения вибраций	<b>58</b>
<b>Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М.</b> Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами	<b>70</b>
<b>Визуализация результатов научных исследований</b>	
<b>Иванова И.Ю., Иванов Р.А.</b> Использование геовизуализации при анализе размещения объектов энергетической инфраструктуры центральной экологической зоны Байкальской природной территории	<b>80</b>
<b>Марухина О.В., Берестнева О.Г., Боброва М.В., Шаропин К.А.</b> Визуализация и анализ многомерных экспериментальных данных	<b>90</b>
<b>Титов А.Г., Окладников И.Г., Гордов Е.П.</b> Разработка Веб-ГИС на основе сервисов обработки и визуализации пространственных данных для анализа и прогнозирования региональных климатических изменений	<b>96</b>
<b>Авраменко Ю.В., Шумилов А.С.</b> Метод обработки растровых изображений в рамках модели MAPREDUCE	<b>110</b>
<b>Черкашин А.К., Лесных С.И.</b> Статистические методы создания интегральных карт на основе базы данных территории муниципального района	<b>116</b>
<b>Правила приема статей в журнал</b>	<b>124</b>

	<b>Content</b>
<b>EDITOR'S FOREWORD</b>	<b>5</b>
<b>Mathematical modeling in scientific research</b>	
<b>Anastasia V. Myadzelets, Alexander K. Cherkashin</b> Investment process models taking into account regional heterogeneity	7
<b>Elena V. Gal'perova</b> Set of models for long-term forecasting of market energy demand	17
<b>Olga S. Isaeva, Evgeny A. Gruzenko</b> Heuristic method of constructing a model of spacecraft command and measuring system	28
<b>Sergey V. Eliseev, Vladimir B. Kashuba, Inna V. Kovrigina, Nikita Z. Kinash</b> Virtual lever ties: particularities of mechanical oscillation systems	38
<b>Vladimir B. Kashuba, Roman S. Bolshakov, Nikita Z. Kinash</b> About extension of estimation dynamical circumstance parameters set of mechanical oscillation systems	50
<b>Andrey V. Eliseev, Evgeniy V. Kaimov, Nguyen Duc Huynh, Vuong Quang Truc</b> Dynamical absorption of oscillation in system structure of vibrations excitation	58
<b>Vasilij P. Zakaryukin, Andrey V. Kryukov, Il'ya M. Avdienko</b> Modelling of traction power supply systems equipped with symmetrizing devices	70
<b>Visualization of scientific research results</b>	
<b>Irina Yu. Ivanova, Roman A. Ivanov</b> The use of geovisualization in the analysis of energy infrastructure placement in the central ecological zone of the Baikal natural territory	80
<b>Olga V. Marukhina, Olga G. Berestneva, Elena E. Mokina</b> Visualization and analysis of multi-dimensional experimental data	90
<b>Alexander G. Titov, Igor G. Okladnikov, Evgeny P. Gordov</b> Web mapping system development based on geospatial data processing and visualization services for regional climate change analysis and forecast	96
<b>Yuriy V. Avramenko, Alexander S. Shumilov</b> Processing of raster images based on MAPREDUCE model	110
<b>Alexander K. Cherkashin, Svetlana I. Lesnykh</b> Statistical technology of integral maps creation on the database of the territory the municipal district	116
<b>Call for papers</b>	<b>124</b>

## Уважаемые читатели!

Вашему вниманию предлагается вторая часть четвертого выпуска журнала «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Этот выпуск включает прошедшие отбор и рецензирование статьи, отражающие содержание докладов и сообщений, сделанных на одноименной конференции в 2016 г, проведенной при поддержке ФАНО и грантов РФФИ № 16-07-20343 и № 16-37-10216.

Начиная с этого года, Труды конференции отдельно не издаются, статьи включаются в выпуски предлагаемого вашему вниманию журнала (четыре выпуска в год). Правила подготовки и сроки подачи статей приведены в конце выпуска и на сайте конференции [imt@isem.irk.ru](mailto:imt@isem.irk.ru). Статьи, не прошедшие рецензирование, отклоняются либо передаются авторам на доработку.

Вторая часть четвертого выпуска включает разделы «Математическое моделирование в научных исследованиях» и «Визуализация результатов научных исследований». Первый раздел открывается статьей Мядзелец А.В. и Черкашина А.К. «Учет региональной неоднородности в моделях инвестиционного процесса» (ИГ СО РАН, г. Иркутск). Статья посвящена разработке математической технологии исследования неоднородности социально-экономического пространства с количественной оценкой особенностей региональной среды. Пространственная неоднородность развития регионов России представлена на ГИС-картограммах, иллюстрирующих различные градации индикаторов неоднородности. В статье Гальперовой Е.В. (ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск) «Использование стенда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители» показаны преимущества построения методического инструментария в виде стенда (набора) отдельных моделей для реализации пошагового подхода к долгосрочному прогнозированию рыночного спроса на энергоносители. Приводятся экспериментальные результаты по оценке долгосрочной ценовой эластичности спроса на природный газ для укрупненных регионов России и влиянию на нее разного представлений о характере неопределенности исходных данных. В статье Исаевой О.С., Грузенко Е.А. «Эвристический метод построения модели функционирования командно-измерительной системы космического аппарата» (ИВМ СО РАН, г. Красноярск) рассматривается метод построения модели функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата, основанный на использовании дерева допустимых изменений, определяющих переходы от текущего состояния модели к последующим состояниям. В статье Кашубы В.Б. (БГУ, г. Братск), Большакова Р.С. (ИрГУПС, г. Иркутск), Кинаша Н.Ж. (МИЦ МЖД, г. Москва) «О расширении набора параметров оценки динамического состояния механических колебательных систем» приводятся результаты исследований механической колебательной системы с двумя степенями свободы, выполненных на основе сопоставления расчетной схемы исходной системы и эквивалентной в динамическом отношении структурной схемы автоматического управления. Показано, что динамическая реакция может быть использована в качестве дополнительного параметра оценки динамического состояния механической колебательной системы. В статье Елисеева А.В., Каимова Е.В., Нгуен Дык Хуинь, Вьонг Куанг Чык «Динамическое гашение колебаний в структуре системы возбуждения вибраций» (ИрГУПС, г. Иркутск) описаны разработанная авторами математическая модель вибростенда с инерционным возбуждением и предложенные аналитические соотношения. Приводятся методика расчета и результаты численного эксперимента. Раздел завершается статьей Закарюкина В.П., Крюкова А.В., Авдиенко И.М. «Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами» (ИрГУПС, г. Иркутск), в которой рассмотрены вопросы моделирования вышеупомянутых систем на основе методов, разработанных в ИрГУПС. Приведены результаты компьютерного моделирования на основе программного комплекса Fazonord, подтверждающие достаточно высокую эффективность применения симметрирующих устройств.

Раздел «Визуализация результатов научных исследований» открывается статьей Ивановой И.Ю. и Иванова Р.А. «Использование геовизуализации при анализе размещения объектов энергетической инфраструктуры центральной экологической зоны Байкальской природной территории» (ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск). В статье показаны возможности средств геовизуализации при аналитических исследованиях для идентификации размещения энергоисточников и прохождения трасс линий электропередачи. Объектом визуализации является энергетическая инфраструктура центральной экологической зоны Байкальской природной территории. Представлены общий вид и подробный фрагмент разработанной информационной системы, включающей средства визуализации, приведены примеры. Статья Марухиной О.В., Берестневой О.Г., Бобровой М.В., Шаропина К.А. «Визуализация и анализ многомерных экспериментальных данных» (ТПУ, г. Томск) посвящена оценке биологического системного состояния с помощью методов обработки изображений на примере решения проблемы идентификации психологических и физиологических характеристик пациентов с различными формами астмы. Описана разработка программного продукта на основе пиктографиков «Лица Чернова», предназначенного для формирования графических образов, отображающих функциональное состояние человека, и, в частности, динамику изменения состояния пациентов в процессе лечения. В статье Титова А.Г., Окладникова И.Г., Гордова Е. П. «Разработка Веб-ГИС на основе сервисов обработки и визуализации пространственных данных для анализа и прогнозирования региональных климатических изменений» (ИМКЭС СО РАН, г. Томск) описывается рабочая версия сервис-ориентированной Веб-ГИС для анализа и прогнозирования региональных климатических изменений, базирующаяся на современных OGC/ISO стандартах сервисов пространственных данных и метаданных, а также апробированном программном обеспечении с открытым кодом. Тестирование Веб-ГИС показало ее эффективность при решении прикладных задач и распространении результатов исследований в картографическом представлении. В статье Авраменко Ю.В. Шумилова А.С. «Метод обработки растровых изображений в рамках модели MAPREDUCE» (ИДСТУ РАН, г. Иркутск) рассматривается метод обработки растровых изображений на основе модели распределенных вычислений MapReduce. Предлагаемый метод позволяет использовать инструменты пространственного анализа растровых изображений в распределенной вычислительной среде без их модификации. Выпуск завершается статьей Черкашина А.К., Лесных С. И. «Статистические методы создания интегральных карт на основе базы данных территории муниципального района» (ИГ СО РАН, г. Иркутск). В статье рассматриваются методы расчета интегральных показателей (ИП) состояния среды, которые объединяют разнокачественную пространственную информацию о географическом положении объектов с учетом научных принципов квалиметрии. Приведена картограмма по результатам расчетов ИП, основанных на данных лесоустройства Слюдянского лесхоза в границах Слюдянского муниципального района Иркутской области.

Представленный выпуск является завершающим в текущем году. Ссылка на публикации в E-library: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1678074>. Мы благодарим наших авторов и участников одноименной конференции за активное сотрудничество и надеемся на его продолжение. Просим авторов, а особенно руководителей аспирантов и молодых ученых, обращать внимание на качество статей, необходимое количество ссылок (желательно не менее 10), а также на выделение новизны публикуемых результатов, постольку требования рецензентов к статьям в дальнейшем будут более строгими.

Надеемся, что следующий год будет не менее плодотворным и успешным для наших коллег, авторов статей и участников конференции. Желаем всем счастливого Нового года, удачи и успехов, новых интересных встреч и ошеломляющих научных результатов в наступающем 2017-м!

Л.В. Массель

УДК 004.021:332.1

## КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ УЧЕТ РЕГИОНАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В МОДЕЛЯХ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЦЕССА

**Мядзелец Анастасия Викторовна**

К.г.н., с.н.с., Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, e-mail: [anastasia@irigs.irk.ru](mailto:anastasia@irigs.irk.ru)

**Черкашин Александр Константинович**

Д.г.н., профессор, зав. лабораторией теоретической географии,  
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена разработке математической технологии исследования неоднородности социально-экономического пространства с количественной оценкой особенностей региональной среды. Выполнен сравнительный анализ развития регионов России с использованием математических моделей и методов анализа временных рядов данных связи валовых внутренних инвестиций и объемов производства промышленности и сельского хозяйства за 2000-2013 гг. Модель представлена в виде билинейной индикативной функции экономических факторов. Она описывает инвестиционные процессы на территории через взаимосвязь экстенсивных индикаторов регионального развития (объемов производства) и интенсивных потенциалов чувствительности (коэффициентов-акселераторов). На основе анализа интенсивных параметров модели оценивается временная и пространственная неоднородность инвестиционных процессов в регионах и проводится их типологизация по критерию подобия их функциональных связей с использованием определителя Якоби. Расчеты текущих значений акселераторов, характеристик среды и индикаторов осуществляются методами скользящего регрессионного анализа рядов фактических данных по регионам. Пространственная неоднородность развития регионов России представлена на ГИС-картограммах, иллюстрирующих различные градации индикаторов неоднородности.

**Ключевые слова:** региональное неравенство, индикативная модель, сходство и различие экономики, инвестиции

**Введение.** Разработка моделей и методов сравнительного экономико-географического анализа факторов и условий территориального развития на основе выявления структурной неоднородности социально-экономических систем во времени и пространстве является одной из основных проблем региональных исследований. Пространственную неоднородность регионов необходимо учитывать при формировании единой экономической системы страны, принимая во внимание исторические и географические условия их развития. Особенно важным является определение качественных (структурных) и количественных (интегральных) показателей сравнения, позволяющих выявить региональную неоднородность на основе различных социально-экономических показателей.

Исследование неоднородности с помощью математических методов позволит оценить степень неравенства регионального развития и возможность его преодоления через поиск эффективных решений по реализации региональной политики.

Региональное неравенство в основном рассматривается с точки зрения пространственной неоднородности, особенно в больших по территории государствах [3, 10]. Пространственное развитие всегда неравномерно, поэтому считается, что пространственное неравенство возникает как объективное следствие концентрации конкурентных преимуществ в одних территориях и их отсутствия или дефицита в других. По мере развития региональной экономики и экономической географии стали рассматриваться и другие причины неоднородного развития регионов – политическое, социальное, экономическое неравенства. Так, основатель «новой экономической географии» П. Кругман [11] предложил выделять две группы факторов, являющихся основополагающими при выявлении причин неравномерного развития регионов – факторы первой природы, не зависящие от деятельности людей (ресурсы, географическое положение) и второй природы, созданные деятельностью человека и общества (агломерации, институты, инфраструктура). Первые можно отнести к причинам пространственного, а вторые – социально-экономического и политического неравенства. Обе группы факторов для одних территорий могут одновременно являться преимуществами, а для других – барьерами деятельности и должны объективно учитываться при разработке планов регионального развития. Возможно изменение роли, значения и конфигурации факторов со временем по мере развития стран и регионов. Например, для хорошо освоенных территорий постиндустриальных государств роль факторов первой природы снижается, а значимость факторов второй группы повышается, что отражается на проявлении пространственного неравенства и региональной неоднородности.

В современной научной литературе много работ с результатами проведения количественной и качественной оценки степени регионального неравенства [3, 7]. Как правило, с этой целью используются различные коэффициенты (Джинни, Лоренса, вариации, энтропийные меры), характеризующие варьирование различных статистических социально-экономических показателей. Например, соотношение объемов инвестиций и валового регионального продукта (ВРП) применяются для оценки экономического неравенства, а уровни доходов населения и занятости, а также показатели здоровья – для исследования социального неравенства. Недостатки таких исследований определяются тем, что итоговая оценка неоднородности дается на национальном уровне в целом для государства, а не для каждого региона, поэтому межрегиональное сходство и различие социально-экономической ситуации остается за рамками пространственного анализа.

В этой статье предлагаются математические методы для информационной технологии обработки пространственно-временных экономических данных, которые по результатам расчетов позволяют провести сравнительный анализ экономики регионов по критериям различия и сходства условий хозяйственной деятельности. С их помощью предлагается количественно «измерить» степень социально-экономического неравенства и подобие взаимосвязи экономических показателей в разных регионах, величину региональной неоднородности, а также впоследствии выделять тренды (конвергенции и дивергенции) развития регионов.

**1. Математические методы.** Рассматривается система аналитических функций  $z_j(x)$  ( $j = 1, \dots, m$ ) набора переменных  $x = \{x_i\}$ , ( $i = 1, \dots, n$ ), отражающих, например, зависимость объемов выпуска продукции  $z_j$  по регионам  $j$  от величины используемых в производстве ресурсов  $x_i$ . Для таких функций применимо касательное преобразование Лежандра  $z_j(x) \rightarrow \varphi_j(a_j)$  в точке  $x = x_0 = \{x_{0i}\}$ ,  $z_j = z_{0j} = z_j(x_0)$ :

$$z_j(x) - z_j(x_0) = \sum_{i=1}^n a_{ij}(x_i - x_{0i}) + \varphi_j(a_j), \quad a_{ij} = \frac{\partial z_j}{\partial x_i}, \quad (1)$$

где  $a_j = \{a_{ij}\}$  – набор двойственных набору  $x$  переменных исходной функции  $z_j(x)$ .

Далее в универсальном математическом соотношении (1) учитывается ограничение на функцию Вейерштрасса  $\varphi_j(a_j) = O(x - x_0)^2 = 0$ , т.е. считается, что преобразование Лежандра (1) является вырожденным  $z_j(x) \rightarrow 0$  [9]. Тогда система (1) описывается уравнениями

$$z_j(x) - z_j(x_0) = \sum_{i=1}^n a_{ij}(x_i - x_{0i}). \quad (2)$$

С учетом смещений переменных на постоянное значение  $w_j(y) = z_j(x) - z_{0j}$ ,  $y_i = x_i - x_{0i}$  уравнение (1) для  $w_j(y)$  соответствует уравнению Эйлера для однородных функций первого порядка  $w_j(sy) = sw_j(y)$ , широко распространенных в экономических приложениях [2]. Набор переменных  $A = \|a_{ij}\|$  составляет матрицу Якоби – оператора связи наборов функций и переменных  $z = Ax$ . Если определитель Якоби  $J = |A| = 0$ , то функции  $z_j(x)$  взаимозависимы [5], на чем основан анализ функционального подобия для широкого класса функций, а не только уравнений вида (2).

Математическая теория матриц и определителей дает ответ на важный вопрос: увеличивается ли значение  $J^2$  или  $|J|$  при росте независимости сравниваемых функций, т.е. является ли величина  $|J|$  мерой «функционального расстояния»? Доказана связь  $J$  с определителем Грама  $\Gamma$ , величина которого является мерой независимости векторов и функций в показателях отклонения положительного значения  $\Gamma$  от нуля, указывающего при  $\Gamma = 0$  на их полную линейную зависимость [6, с. 32]:  $\Gamma = J^2$ . Критерий  $J$  позволяет судить о том, как каждая экономическая система, описываемая индивидуальными соотношениями, функционально связана или не связана с другими системами, и по оценке тесноты связи  $J$  проводить их типологизацию [1].

Учет характеристик  $z_{0j}, x_0 = \{x_{0i}\}$  делает уравнение (2) неоднородным с симметричной структурой относительно наблюдаемых (натуральных) переменных  $(z_j, x_j)$  и постоянных значений  $(z_{0j}, x_0)$ , учитывающих особенности внешней среды:

$$z_j(x) - \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = z_{0j} - \sum_{i=1}^n a_{ij} x_{0i} \quad (3)$$

Переменные  $a_j = \{a_{ij}\}$  отражают особенности внутренних связей системы. Линейный относительно  $a_j = \{a_{ij}\}$  показатель

$$f_j(a_j) = z_{0j} - \sum_{i=1}^n a_{ij} x_{0i} \quad (4)$$

совокупно выражает свойства связи параметров системы и ее среды. Он и с математической, и с содержательной точки зрения характеризует ситуацию в виде неоднородного слагаемого в правой части уравнения (3).

Информационно-математическая технология состоит из нескольких этапов поиска и обоснования математических методов анализа пространственно-временных рядов данных и информационной технологии их статистической обработки с выходом на геоинформационное картографирование (рис. 1). На этапе статистической обработки данных по региону, согласно соотношениям (3)-(4), связь наборов данных  $z_j(t), x(t)$  аппроксимируется поинтервально в скользящем режиме уравнением линейной регрессии

$$z_j(x_j) = \sum_{i=1}^n a_{ij} x_{0i} + f_j(a_j) \quad (5)$$

с оценкой значений коэффициентов  $a_j = \{a_{ij}\}$  и  $f_j$  для каждого временного интервала. Затем исследуется линейная зависимость  $f(a_j)$  вида (4) с определением коэффициентов  $z_{0j}, x_0 = \{x_{0i}\}$  методами регрессионного анализа. По результатам расчета восстанавливается вид уравнения (2) для каждого региона  $j$  с изменяющимися во времени коэффициентами  $a_{ij}$  и постоянными региональными характеристиками среды  $z_{0j}, x_0$ . Однородность функций  $w_j(y) = z_j(x) - z_{0j}$  относительно смещенных значений аргументов  $y_i = x_i - x_{0i}$  и постоянство характеристик  $z_{0j}, x_0$  внешней среды подтверждается высокими значениями коэффициентов множественной корреляции линейной зависимости  $f(a_j)$  вида (4).

При функциональном сравнении регионов коэффициенты  $a_{ij}$  одного из них выбираются за основу и сравниваются с коэффициентами  $a_{ij}$  других регионов с помощью определителя Якоби  $J_j$  для отдельных периодов. Затем рассчитывается среднее квадратическое отклонение  $J_j$  от 0 за весь период. Таким образом, проводится сопоставление всех регионов, и из них выбираются те, которые наиболее близки по критерию  $J_j \rightarrow 0$ .

## 2. Оценка неоднородности экономического развития регионов.

Предложенный алгоритм реализуется на примере количественного анализа по регионам  $j$  зависимости валовых внутренних инвестиций  $z_j(x)$  (млн. руб./год) от объемов выпуска продукции промышленными  $x_{1j}$  и сельскохозяйственными  $x_{2j}$  предприятиями (млн. руб./год) регионов России. Расчеты основаны на показателях (в текущих ценах) социально-экономического состояния и развития территорий из базы данных Госкомстата России за

1999-2013 гг. Такой зависимостью определяется экономическое развитие территории, под которым в данном случае понимается инвестиционный процесс – циклы финансирования проектов, объемы которого связаны с результатами реализации проектов (производством) и обусловлены природной и социально-экономической средой инвестирования и хозяйственной деятельности. Реализуется механизм обратной связи размеров инвестиций и результатов производственной или иной доходной деятельности, так что согласно (2) приращение инвестиций определяется увеличением объемов производства  $x_j$ , эффективности инвестирования  $a_j$  и улучшением инвестиционной среды  $(z_{0j}, x_{0j})$ .

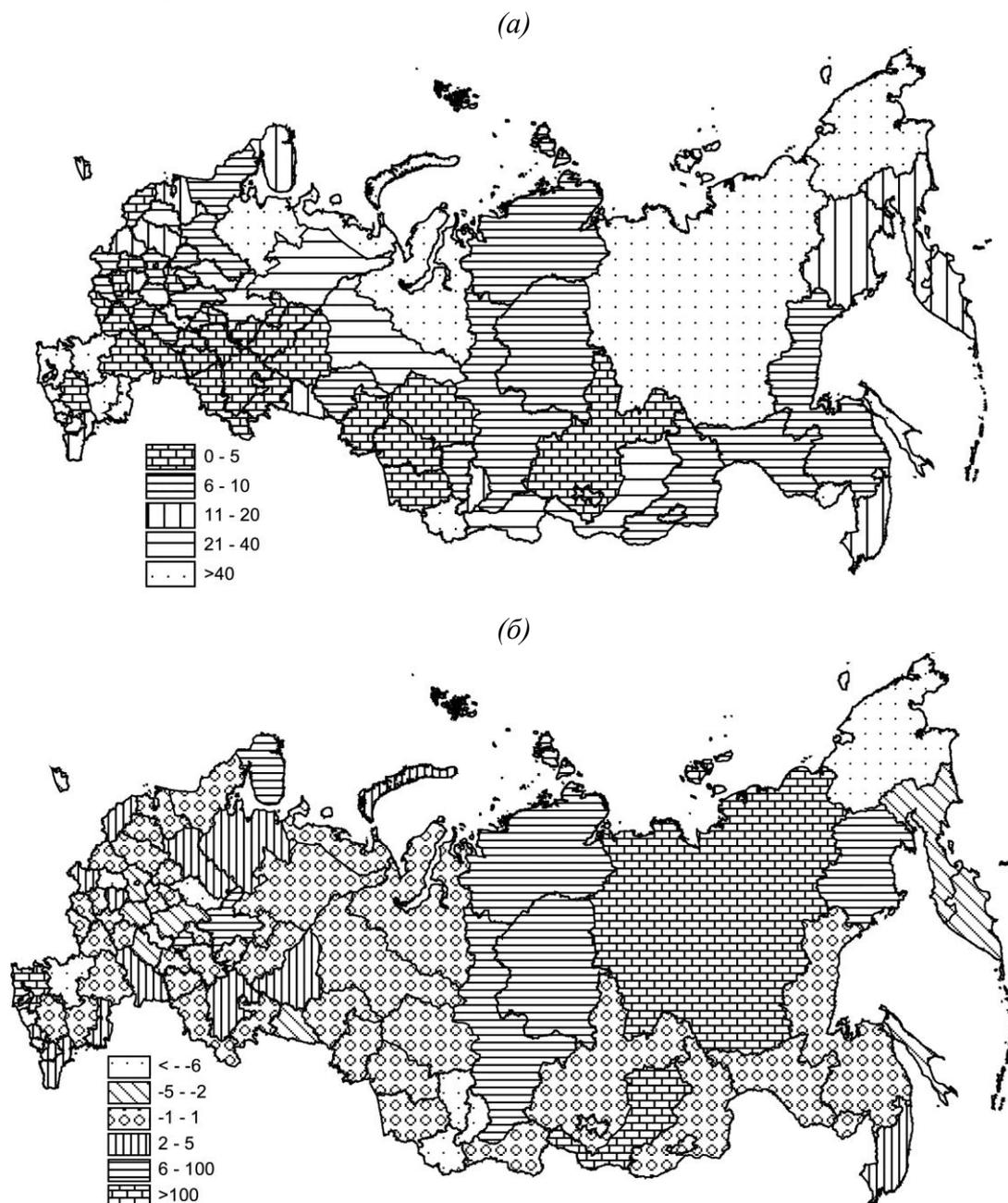


Рис. 1. Схема информационно-математической технологии анализа пространственно-временных рядов данных

В уравнении (2) переменные  $a_{ij}$  имеют смысл показателя акселерации (интенсивности отдачи) инвестиционного процесса по группам отраслей. Индикаторами хозяйственных условий развития экономики являются показатели  $x_{01j}$ ,  $x_{02j}$ , влияющие на величину  $z_{0j}$  и на изменение инвестиционного потока  $z_j(x_j)$ . Индикаторы условий развития  $x_{01j}$ ,  $x_{02j}$ ,  $z_{0j}$  совокупно зависят от предыстории развития и масштаба производства, ресурсного потенциала территории, величины факторов производства, преимуществ географического положения, а также особенностей регионального управления и уровня федеральной поддержки регионов [8]. Индикаторы условий определяются прямо из рассматриваемой временной серии экономических показателей и комплексно характеризуют изучаемый

период. Они могут трактоваться как показатели качества экономического роста и регионального развития [4].

Процедура обработки пространственно-временных данных завершается геоинформационным картографированием результатов расчетов. Например, пространственная неоднородность развития регионов России показана на картограмме (рис. 2а), где разной штриховкой указаны градации индикатора сходства и различия  $J_j$  реализации инвестиционного процесса разных регионов по сравнению с экономикой Иркутской области. На рис. 2б отображена пространственная изменчивость по регионам в 2011-2013 гг. показателя  $f(a_j)$ , рассматриваемого в качестве значений эффективности инвестиционного процесса с учетом масштаба экономики.



**Рис. 2.** Территориальная неоднородность регионов России в показателях а) межрегионального сходства  $J_j$  инвестиционных процессов и б) эффективности инвестиций  $f(a_j)$ . В легенде указаны интервалы изменения показателей для разного типа регионов.

На картограмме функционального сходства развития региональных экономик с экономикой Иркутской области значения  $J_j \leq 10$  выделяют регионы промышленного пояса России (рис. 2а). Наиболее сходными ( $J_j \leq 2$ ) с Иркутской областью по тенденциям развития являются Волгоградская, Самарская области и Республика Татарстан. Территориально близкий Красноярский Край сходен с ней на уровне  $J_j \leq 6$ .

Наименьшая эффективность  $f(a_j)$  (рис. 2б) соответствует Чукотскому автономному округу и Республике Мордовия, наибольшие – Республикам Бурятия и Якутия (Саха). В Бурятии это связано с низким уровнем инвестиционных условий  $z_{0j}$ . В Якутии наблюдается самое высокое в России среднее абсолютное значение эффективности  $f_j$ . Это определено тем, что в посткризисный период независимо от текущих результатов производства в экономику Республики вливались огромные средства, обеспечившие ускоренный рост ресурсных отраслей, что характерно для территорий нового хозяйственного освоения. Челябинская, Иркутская и Новосибирская области имеют благоприятную величину  $f_j$  со значениями  $f(a_j)$ , близкими к единице. Эти области также обладают высокими показателями инвестиционных условий  $z_{0j}$ .

**Заключение.** Математическая технология реализуется в последовательности вовлечения математических понятий и их доказанных соотношений в процесс обработки информации (см. рис. 1). На их основе с учетом содержательно обусловленных ограничений создаются формулы и уравнения для разработки методов анализа данных и знаний, составляющих базис процедур информационных технологий. Такой подход продемонстрирован на примере обоснования методов количественного учета региональной неоднородности в моделях инвестиционного процесса.

Предлагаемые индикаторы эффективности инвестиций  $f_j$  и межрегионального сходства  $J_j$  инвестиционных процессов являются интегральными показателями, количественно характеризующими влияние внутренней (через акселераторы  $a_{ij}$ ) и внешней (через условия  $z_{0j}, x_{0j}$ ) среды. Они выводятся из универсального математического соотношения – преобразования Лежандра  $z_j(x) \rightarrow \varphi_j(a_j)$  при ограничении  $\varphi_j(a_j) = 0$ , определяющем вырожденность этого преобразования для функции связи переменных, смещенных относительно характеристик среды. В результате, с одной стороны, выводится уравнение Эйлера, широко используемое в математической экономике, а с другой, – показатель функционального сходства систем в виде определителя Якоби. На основе этого в итоге выделяются критерии для количественного учета неоднородности и подобия функций связи экономических показателей. Полученные соотношения используются для статистического анализа пространственно-временных рядов данных зависимости объемов внутренних инвестиций от ВРП промышленности и сельского хозяйства.

Реализованный подход демонстрирует часть возможностей применения математических знаний для обоснования методов анализа пространственно-временных данных, которые могут быть использованы для обработки не только экономических показателей в процедурах информационной технологии. Интересные возможности развития

процедур математической технологии открываются при решении дифференциальных уравнений разного вида и задач оптимального управления, причем данный информационно-статистический анализ позволяет получить модели с идентифицированными коэффициентами связей и показателями состояния среды и решать прикладные задачи с применением известных математических методов.

Для совершенствования взаимодействия процедур математических и информационных технологий необходимы онтологии организации математических знаний, демонстрирующие их связи в форме дерева выводов для понимания возможностей их применения в практике статистического анализа данных. Другая проблема – разработка численных методов анализа для перевода аналитических выражений в зависимости дискретных эмпирических величин для обеспечения необходимой точности трансляции процедур математических в процедуры информационных технологий.

*Публикация подготовлена в рамках поддержанного РГНФ научного проекта № 16-02-00570(а).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомология и гомотопия географических систем / Истомина Е.А., Черкашин А.К. и др. Новосибирск: Гео. 2009. 350 с.
2. Гранберг А.Г. Моделирование социалистической экономики. М.: Экономика. 1988. 488 с.
3. Зубаревич Н.В. Регионы России: неравенство, кризис, модернизация. М.: Независимый институт социальной политики. 2010. 160 с.
4. Клисторин В.И. Качество экономического роста и региональное развитие // Регион: экономика и социология. 2006. № 3. С. 30-41.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука. 1977. 832 с.
6. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. Т. 1. М.-Л. 1933. 525 с.
7. Новиков А.А. Региональное неравенство в социально-экономическом развитии России // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 1. С. 1-9. <http://publ.naukovedenie.ru>
8. Постникова Е.А., Лавровский Б.Л. Моделирование федеральной поддержки регионов (на примере Сибирского федерального округа) // Регион: экономика и социология. 2008. № 2. С. 175-193.
9. Черкашин А.К., Мядзелец А.В. Восстановление нелинейной зависимости качества жизни населения от социально-экономического потенциала регионов Сибири // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 149-160.
10. Friedmann J. Regional Development Policy. Boston. 1966.
11. Krugman P.R. Geography and Trade. Cambridge (Mass.). 1991.

**INVESTMENT PROCESS MODELS  
TAKING INTO ACCOUNT REGIONAL HETEROGENEITY**

**Anastasia V. Myadzelets**

Candidate of geographical science, senior researcher, V.B. Sochava Institute of Geography,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Science,  
664033, Russia, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 1, e-mail: [anastasia@irigs.irk.ru](mailto:anastasia@irigs.irk.ru)

**Alexander K. Cherkashin**

Dr., Professor, Head of the laboratory of Theoretical geography,  
V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Science,  
664033, Russia, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 1, e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Abstract.** Working out of the mathematical technology of study of social-economic space heterogeneity and quantitative assessment of regional environment peculiarities are considered in the paper. Comparative analysis of development of Russian regions is fulfilled using mathematical models and analysis methods of data time series of relations between investment and gross regional product of industry and agriculture for 2000-2013. The model is a bilinear indication function of economic factors. In the research the function describes investment processes at a territory through interaction of extensive indicators of regional development (production) and its intensive potentials of sensitivity (coefficients of accelerates). Temporal and spatial heterogeneity of the investment process is assessed and typology of the regions by a similarity criterion is carried out on the base of analysis of the intensive parameters and Jacob determinant. Calculation of current values of the accelerators, conditional characteristics and indicators is fulfilled with regression methods using factual data of the regions. In the result the territorial heterogeneity of regional development of Russia is shown at GIS-cartograms by different gradations of the heterogeneity indicators.

**Keywords:** regional disparity, indication model, similarity and difference of regional economic, investment

**References**

1. Gomologiya i gomotopiya geograficheskikh sistem [Homology and Homotopy in Geographic Systems] / Istomina E.A., Cherkashin A.K., and others. Novosibirsk: Geo. 2009. 350 p.
2. Granberg A.G. Modelirovanie socialisticheskoy ehkonomiki [Modeling of Social Economy]. M.: Economics. 1988. 488 pp
3. Zubarevich N.B. Regiony Rossii: neravenstvo, krizis, modernizaciya [Regions of Russia: Inequality, Depression, Modernization]. M.: The Independent Institute of Social Policy. 2010. 160 p.
4. Klistorin V.I. Kachestvo ehkonomicheskogo rosta i regional'noe razvitie [Regional Development and Quality of Economic Growth] // Region: Economics and Sociology. 2006. Vol. 3. Pp. 30-41.
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike [Mathematics Handbook]. M.: Nauka. 1977. 832 p.

6. Kurant R., Gilbert D. *Metody matematicheskoy fiziki* [Methods of Mathematical Physics]. Vol. 1. M.-L. 1933. 525 p.
7. Novikov A.A. *Regional'noe neravenstvo v social'no-ehkonomicheskom razvitii Rossii* [Regional Disparities in the Socio-Economic Development of Russia] // *Naukovedenie*. 2013. Vol. 1. Pp. 1-9. <http://publ.naukovedenie.ru>
8. Postnikova E.A., Lavrovskii B.L. *Modelirovanie federal'noj podderzhki regionov (na primere Sibirskogo federal'nogo okruga)* [Modeling of Federal Support of Regions (the Case Study of the Siberian Federal Okrug)] // *Region: Economics and Sociology*. 2008. Vol. 2. Pp. 175-193.
9. Cherkashin A.K., Myadzelets A.V. *Vosstanovlenie nelinejnoj zavisimosti kachestva zhizni naseleniya ot social'no-ehkonomicheskogo potenciala regionov Sibiri* [Reconstructing a Nonlinear Dependence of the Quality of Life on the Socio-Economic Potential of Siberia's Regions] // *Geography and Natural Resources*. 2014. Vol. 2. Pp. 149-160.
10. Friedmann J. *Regional Development Policy*. Boston. 1966.
11. Krugman P.R. *Geography and Trade*. Cambridge (Mass.). 1991.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕНДА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЫНОЧНОГО СПРОСА НА ЭНЕРГОНОСИТЕЛИ<sup>1</sup>

Гальперова Елена Васильевна

К.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Взаимосвязи энергетики и экономики»,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: [galper@isem.irk.ru](mailto:galper@isem.irk.ru)

**Аннотация.** Показаны преимущества построения методического инструментария в виде стенда (набора) отдельных моделей для реализации пошагового подхода к долгосрочному прогнозированию рыночного спроса на энергоносители. Дано краткое описание используемых моделей. В качестве примера применения независимых моделей для решения возникающих задач на разных шагах исследования приводятся экспериментальные результаты по оценке долгосрочной ценовой эластичности спроса на природный газ для укрупненных регионов России и влиянию на нее разного представлений о характере неопределенности исходных данных.

**Ключевые слова:** модель, оптимизация, прогнозирование, неопределенность, Монте-Карло, эластичность спроса, цена, энергоносители, энергоснабжение.

**Введение.** Долгосрочное прогнозирование спроса на разные виды энергоносителей является важным этапом при разработке программ и стратегий развития энергетики и экономики страны и регионов и принятии инвестиционных решений в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК). Методология прогнозирования спроса на энергоносители идет в направлении все более полного учета факторов и взаимосвязей, влияющих на его перспективные объемы (темпы роста экономики, развитие новых и энергосберегающих технологий, уровень и стиль жизни населения, цены на энергоресурсы и т.д.). В связи с этим в последнее время усилилось внимание к разработке больших сложных моделей и увязке их в модельные комплексы. Например, в ИНЭИ РАН прогнозирование спроса на ТЭР осуществляется с помощью распределенного модельно-информационного комплекса EDFIS [12] во взаимосвязи с нелинейной оптимизационной экономико-математической моделью энергетики в экономике МЭНЭК, входящих в состав модельно-информационного комплекса SCANNER [13].

В странах Западной Европы получила распространение система моделей PRIMES [14] для анализа энергетической политики во взаимосвязи с энергетическими технологиями. В блоке энергопотребления этой системы рассчитываются потребности в разных видах энергии по секторам экономики с учетом около 200 возможных видов технологий производства продукции в промышленности и более 30 технологий потребления энергии в жилом и коммерческом секторах.

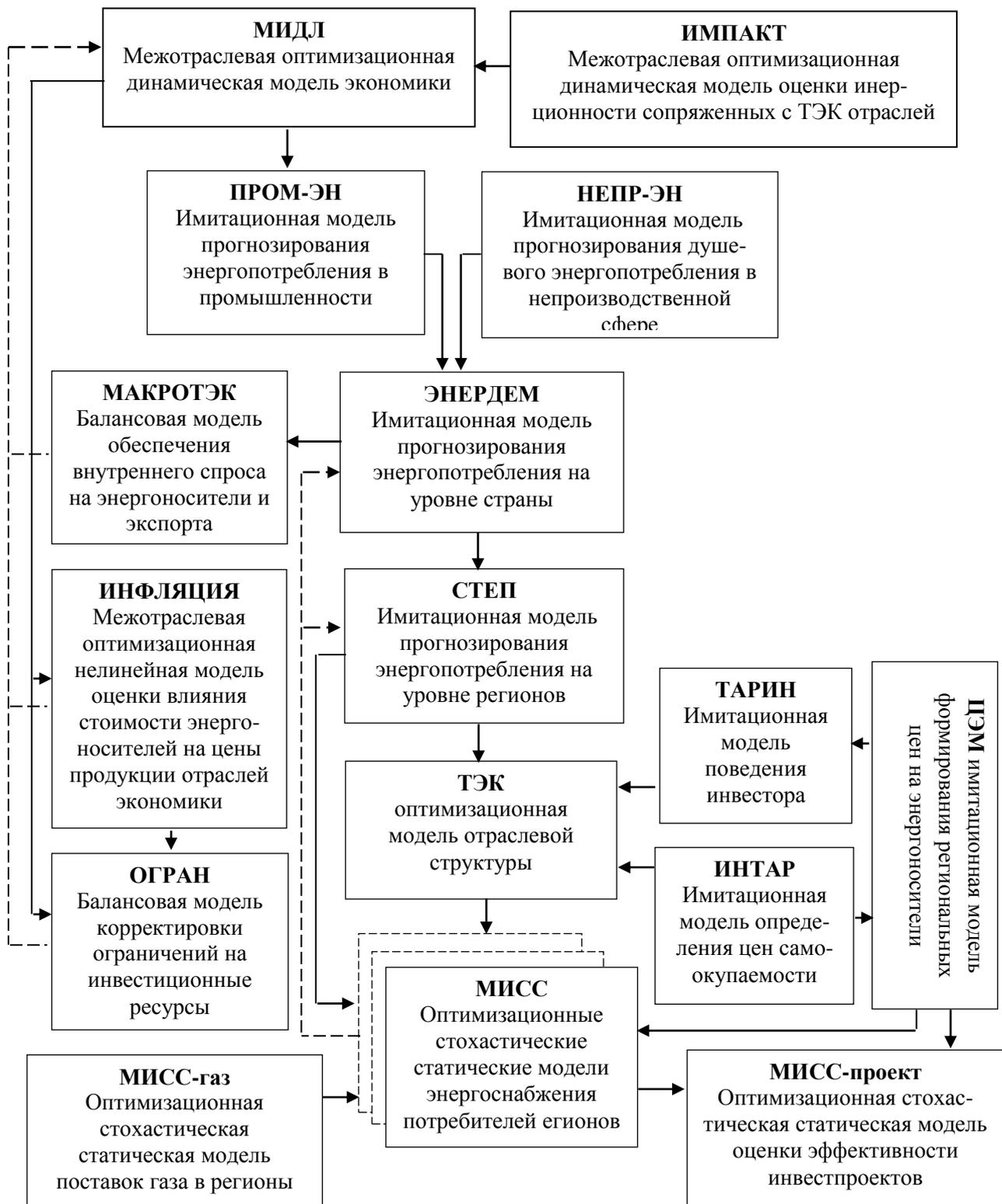
<sup>1</sup> Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-06-00230 и проект № 16-06-00091)

В США постоянно совершенствуется система моделей NEMS разработанная Министерством энергетики для долгосрочного прогнозирования развития энергетики [15]. Она объединяет более 10 моделей. В каждой отраслевой модели определяется баланс спроса и предложения энергоресурсов по девяти укрупненным регионам. Более подробный анализ моделей и модельных комплексов представлен в [5, 7].

Преимуществом таких модельных систем является возможность комплексного анализа прямых и обратных связей между энергетической системой и экономикой совместно с оптимизацией систем топливо- и энергоснабжения, определением энергетических балансов по отраслям и секторам экономики, а также оценкой эффективности инвестиций, экологических проблем и т.д.

Однако, как отмечают сами авторы подобных разработок, несмотря на то, что в настоящее время нет принципиальных математических и вычислительных ограничений на создание подобных комплексов, эффективность их практического применения не всегда соответствует затратам на их создание. Такие комплексы трудно обеспечить информацией и отлаживать, еще труднее интерпретировать решения и анализировать роль отдельных факторов. Представляется, что неформализованный подход, где информация, получаемая из одной модели, анализируется экспертами и служит входом в другую модель, существенно облегчает исследование долгосрочных проблем. Именно такой подход реализуется в ИСЭМ СО РАН при исследовании долгосрочных стратегий развития ТЭК страны на перспективу 25-30 лет. На протяжении многих лет используется и постоянно развивается для решения новых возникающих проблем и задач стенд (набор) разного вида моделей (рис. 1). Поскольку модели жестко не связаны между собой автоматизированными процедурами, то в зависимости от исследуемой проблемы каждая модель может решать как свои специфические задачи, так и использоваться в разной комбинации с другими моделями.

**1. Общая характеристика стенда моделей.** Оценка будущей потребности в ТЭР является важной составной частью исследований долгосрочных стратегий развития ТЭК страны и регионов. При этом изменившиеся условия функционирования энергетики и экономики (усиление роли рыночных отношений, изменение методов управления и взаимодействия производителей и потребителей энергии, повышение роли ценового и регионального факторов, рост неопределенности будущего развития страны и территорий, и т.д.) требует развитие существующих методов и моделей. В ИСЭМ СО РАН для исследования и прогнозирования рыночного спроса на энергоносители разрабатывается пошаговый методический подход. Подход исходит из того, что в перспективе спрос на электро-, теплоэнергию и топливо будет формироваться в условиях растущей неопределенности на развивающихся региональных энергетических рынках и усилении конкуренции энергоносителей. В связи с этим задача прогноза спроса на ТЭР решается во взаимной увязке с исследованиями развития экономики, энергетики и ценообразованием в ТЭК. Реализация подхода предполагает, что на каждом его шаге для решения определенных задач из имеющегося стенда выбирается свой набор моделей с разной степенью агрегирования факторов и взаимосвязей [7]. Это позволяет, в том числе, привести в соответствие требуемую точность результатов с точностью, используемой для этого информации [8, 9]. Последовательность шагов, решаемые задачи и используемые модели представлены на рис. 2.



**Рис. 1.** Стенд существующих и разрабатываемых моделей и их основные взаимосвязи для формирования и оценки вариантов долгосрочного развития ТЭК страны

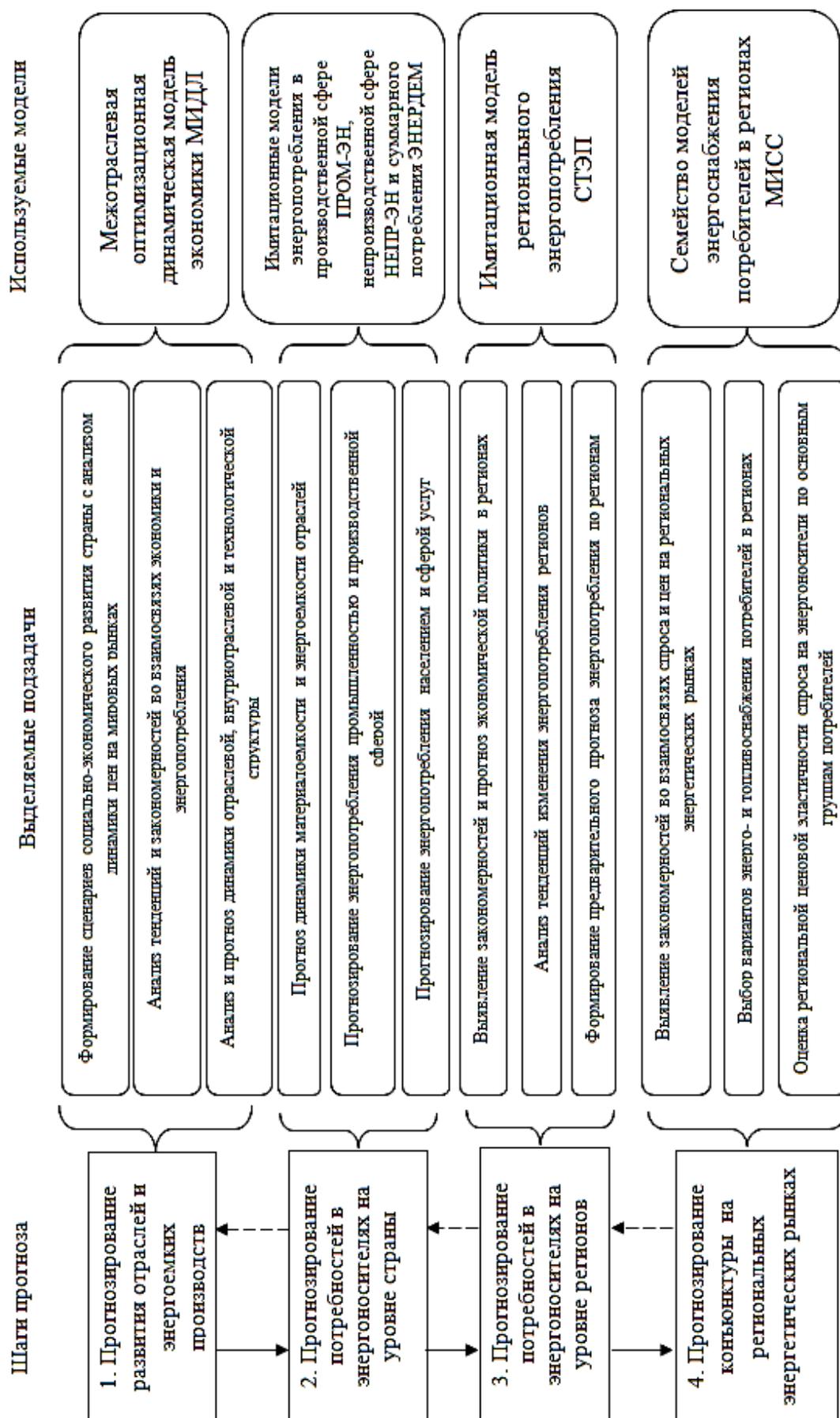


Рис. 2. Пошаговая схема прогнозирования рыночного спроса на топливо и энергию, выделяемые задачи и используемые модели

## 2. Краткая характеристика моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители.

**2.1. Межотраслевая оптимизационная динамическая модель экономики МИДЛ** предназначена для приближенной оценки (в увязке с другими моделями) возможного влияния изменений в ТЭК страны на развитие экономики, определения сравнительной макроэкономической эффективности вариантов развития энергетики, разагрегирования (детализация по 25 отраслям экономики) задаваемой макроэкономической информации о сценариях развития экономики для прогнозной оценки потребностей в энергоносителях.

Основными уравнениями модели являются выраженные в стоимостной форме балансы производства и потребления продукции рассматриваемых отраслей:

$$X_i(t) = \sum_j a_{ij}(t)X_j(t) + U_i(t) + Y_i(t) + \mathcal{E}K_i(t) - \text{ИМ}_i(t) + \Delta \bar{Z}_i(t)$$

где  $X_i(t)$  – производство валовой продукции в отрасли  $i$  в году  $t$ ;  $a_{ij}(t)$  – меняющиеся во времени коэффициенты затрат продукции  $i$  на производство продукции  $j$ ;  $U_i(t)$  – затраты продукции фондообразующих отраслей на ввод новых производственных мощностей;  $\mathcal{E}K_i(t)$  и  $\text{ИМ}_i(t)$  – экспорт и импорт  $i$ -й продукции;  $\Delta \bar{Z}_i(t)$  – изменение запасов или задаваемая дополнительная потребность в продукции  $i$ -й отрасли

Критерием является максимум конечного потребления товаров и услуг за рассматриваемый период с учетом задаваемых условий и ограничений:

$$\sum_i \sum_j Y_i(t) \delta_i(t) \rightarrow \max$$

где  $Y_i(t)$  – конечное потребление продукции  $i$  на непроизводственные нужды в году  $t$ ;  $\delta_i(t)$  – дисконтирующий множитель (см. подробнее [4]).

**2.2. Имитационная модель прогнозирования энергопотребления в промышленности ПРОМ-ЭН.** В модели методом прямого счета определяются потребности 16 отраслей промышленности в электроэнергии, централизованном тепле, котельно-печном и моторном топливе, а также в топливе, используемом для сырьевых и нетопливных нужд.

$$E_i(t) = \sum_j e_{ij}(t)X_j(t)$$

где  $E_i(t)$  – суммарный объем потребления  $i$ -го вида энергоресурса в году  $t$ ,  $e_{ij}(t)$  – меняющиеся удельные расходы  $j$ -го вида энергоресурса для  $i$ -ой отрасли,  $X_j(t)$  – объем валовой продукции в отрасли  $j$  в году  $t$ .

Информация о взаимосогласованных объемах валовой продукции всех отраслей берется из результатов расчетов на модели МИДЛ, а динамика изменения коэффициентов их энергоемкости определяется вне модели отдельно для существующих и новых производственных мощностей с учетом зависимости их ввода от темпов роста производства.

**2.3. Имитационная модель прогнозирования душевого энергопотребления в непроизводственной сфере НЕПР-ЭН.** Исходные данные формируются на основе анализа существующих и возможных к реализации перспективных социальных, экономических и технологических факторов и взаимосвязей, влияющих на уровень и стиль жизни населения и развитие сферы услуг. К ним относятся: обеспеченность населения жилыми и общественными зданиями, структура расселения (городское, сельское), типы зданий по

назначению и материалам стен, удельные нормы теплопотерь через ограждающие конструкции зданий, степень насыщенности населения и сферы услуг разными видами электроприборов, удельные расходы энергии основными приборами бытового назначения, душевое потребление горячей воды, расходы энергии на отопление, освещение, приготовление пищи и т.п. (см. подробнее [5]).

**2.4. Имитационная модель прогнозирования суммарного энергопотребления на уровне страны ЭНЕРДЕМ** состоит из нескольких отраслевых и одного обобщающего блоков. В отраслевых блоках транспорта (грузовой и пассажирский), связи, сельского хозяйства и строительства прогноз энергопотребления осуществляется на основе объемов продукции и услуг этих отраслей (результаты модели МИДЛ) и расчетных прогнозных энергоемкостях, последние получаются с использованием специальных регрессионных и аналитических процедур. Информация о перспективной динамике отраслевого энергопотребления, а также энергопотребления в отраслях промышленности (модель ПРОМ-ЭН) поступает в обобщающий блок, где формируются общие объемы энергопотребления производственной сферой. Здесь же рассчитывается энергопотребление непроизводственной сферы на основе принятой в сценарии экономического развития численности населения (из модели МИДЛ) и динамики перспективного душевого энергопотребления (результаты модели НЕПР-ЭН) и определяется суммарный диапазон потребления разных видов ТЭР на уровне страны

**2.5. Имитационная модель регионального энергопотребления СТЭП** используется для агрегирования полученного для страны в целом прогноза спроса на энергоресурсы по регионам (федеральным округам или субъектам федерации в зависимости от решаемой задачи). В производственной сфере оно осуществляется на основе изменения доли региона в ВВП страны

$$B_{er}^{(t)} = B_e^{(t)} \gamma_{er}^{(t_0)} \lambda_r^{(t)} / \lambda_r^{(t_0)}$$

в непроизводственной сфере – пропорционально изменению доли в численности населения страны

$$Q_{er}^{(t)} = Q_e^{(t)} \gamma_{er}^{(t_0)} \delta_r^{(t)} / \delta_r^{(t_0)},$$

где  $B_{er}^{(t)}$ ,  $Q_{er}^{(t)}$  – потребность в энергоносителе  $e$  в регионе  $r$  в году  $t$  соответственно производственной и непроизводственной сферы,  $\gamma_{er}^{(t_0)}$  – доля региона  $r$  в потреблении энергоносителя  $e$  в базовом году  $t_0$  в производственной или непроизводственной сфере,  $\lambda_r$  – доля региона в общероссийском ВВП,  $\delta_r$  – доля региона в численности населения страны.

Затем полученные значения энергопотребления корректируются, учитывая возможное появление факторов, способных существенно повлиять на изменение тенденции энергопотребления в отдельном регионе (намечаемое строительство крупного энергоемкого производства или изменения в миграционной, ценовой политике и т.д.) (см. подробнее [1]).

**2.6. Семейство моделей МИСС.** Семейство имитационных статических стохастических моделей МИСС энергоснабжения разных групп потребителей в регионах находится в стадии разработки. В настоящее время реализованы модели энергоснабжения электростанций, котельных, цементной промышленности и грузового транспорта для отдельных регионов на перспективу 2020 и 2030 гг.

Особенностью моделей является совместное использование метода оптимизации и метода Монте-Карло с возможностью задания разного распределения вероятности в

интервалах используемых исходных данных. Первый метод используется для выбора рациональной структуры энергоснабжения потребителей. Критерием является минимум средней цены производимой в регионе продукции при условии, что цены строятся на принципах самокупаемости (самофинансирования).

$$F = \sum_i \sum_e R_{eij} X_{eij} \rightarrow \min$$

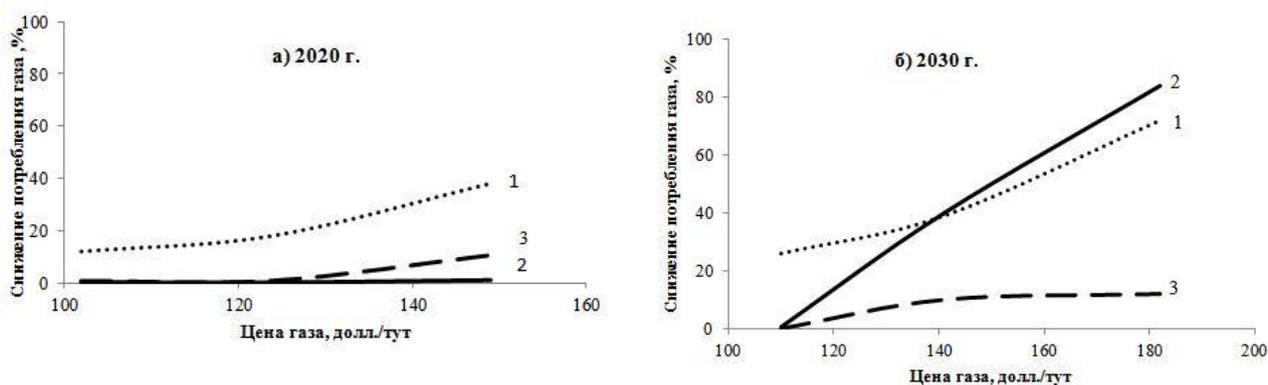
где  $R_{eij} = \sigma_1(c_{ei}b_{eij} + u_{eij}) + \sigma_2\sigma k_{ei}/h_{eij}$  – цена продукции  $i$ , произведенной на энергоносителе (топливе)  $e$ , руб./ед. прод., на установке  $j$ ,  $c_{ei}$  – цена топлива  $e$ , поставляемого потребителю  $i$ , руб./тут,  $b_{eij}$  – удельный расход топлива  $e$  на производство продукции  $i$  на установке  $j$ , тут/ед.прод.,  $k_{eij}$  – удельные капиталовложения на прирост мощности на производство продукции  $i$  на топливе  $e$  на установке  $j$ , руб./ед.мощн.,  $u_{eij}$  – условно-постоянная часть себестоимости продукции  $i$  (без топливной составляющей) производимой с использованием топлива  $e$  на установке  $j$ , руб./ед.прод.,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma$  – коэффициенты корректировки себестоимости, эффективности капиталовложений, дисконтирования.

Второй метод используется для учета неоднозначности будущих условий. Причем исходные технико-экономические, ценовые и другие показатели и ограничения задаются в виде интервалов их возможных значений. Характер распределения вероятности этих показателей внутри диапазона неопределенности задается с использованием т.н. функции бета-распределения, которая позволяет описать практически все возможные типы статистических распределений – равномерное, нормальное, логнормальное, показательное и т.д.

Модели дают возможность оценить изменение объемов использования разных видов ТЭР потребителями в зависимости от их стоимости и определить ценовую эластичность спроса при разных представлениях о характере неопределенности используемой исходной информации. Обобщение расчетных коэффициентов ценовой эластичности спроса на разные виды энергоносителей разными потребителями, позволяет найти региональную ценовую эластичность их суммарного спроса (см. подробнее [2, 6])

**3. Результаты.** Ниже приведены предварительные результаты по решению одной из задач, возникающих на четвертом шаге прогнозирования рыночного спроса на энергоносители. Проводилось исследование по оценке долгосрочной ценовой эластичности спроса на природный газ для укрупненных регионов России и влияния на нее разного представления о характере неопределенности исходных показателей. Для этого из стэнда моделей были выбраны модели энергоснабжения таких потребителей, как электростанции (МИСС-ЭЛ), котельные (МИСС-Т) и цементная промышленность (МИСС-П). В качестве исходной информации были использованы один из разработанных на долгосрочную перспективу прогнозов энергопотребления [11] и прогноз цен на энергоресурсы [10].

Проведенное исследование показало, что изменение спроса на топливо в условиях неоднозначности будущих условий зависит от особенностей потребителей и рассматриваемой перспективы (рис. 3).



**Рис. 3.** Возможное снижение спроса на газ некоторыми промышленными потребителями при его удорожании в Европейской части страны

Источник: [3] и расчеты автора

1- цементная промышленность, 2 - новые электростанции, 3- котельные

Расчетные коэффициенты ценовой эластичности суммарного спроса на газ различаются по территории, зависят от характера неопределенности используемой информации и возрастают по мере увеличения горизонта прогнозирования (табл.1).

Полученные коэффициенты долгосрочной региональной ценовой эластичности спроса на газ позволяют оценить возможное снижение потребления газа в регионах в долгосрочной перспективе при разной ценовой политике и при необходимости скорректировать прогноз на энергоносители, как на региональном уровне, так и на уровне страны при исследовании вариантов развития ТЭК.

**Таблица 1.** Прогнозная ценовая эластичность суммарного спроса на природный газ в регионах при разной вероятности исходной информации

Регион	2020 г.		2030 г.	
	Интервальное распределение	Нормальное распределение	Интервальное распределение	Нормальное распределение
Европейская часть	-0,10	-0,04	-0,61	-0,50
Урал	-0,18	-0,12	-0,44	-0,31
Западная Сибирь	-0,48	-0,47	-0,60	-0,48
Восточная Сибирь	-1,29	-1,26	-1,28	-1,25
Дальний Восток (южная часть)	-0,78	-0,74	-0,88	-0,75

Источник: расчеты автора

Примечание: суммарный перспективный спрос на газ в регионах определялся по основным группам потребителей и в предположении о сохранении структуры потребления газа в регионе на уровне 2013 г. (структура рассчитана по данным Росстат форма 11-ТЭР за 2013 г.)

Интервальное распределение - равномерное от нижней до верхней границы, нормальное распределение - близкое к средним значениям.

**Заключение.** Для реализации разрабатываемого пошагового подхода к долгосрочному прогнозированию рыночного спроса на энергоносители предлагается использовать стенд (набор) моделей, как уже существующих, так и предполагаемых к созданию с разной степенью агрегирования объектов и их взаимосвязей на разных шагах исследования. Такое представление инструментария дает возможность решать отдельные

возникающие задачи независимо друг от друга, подбирая наиболее приемлемый набор моделей, что позволяет уменьшить используемый объем исходной информации и снизить затраты времени на поиск решения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперова Е.В. Особенности прогнозирования энергопотребления на региональном уровне. // Известия РАН. Энергетика. 2004. № 4. С. 61-66.
2. Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. Один подход к оценке влияния неопределенности исходных данных при долгосрочном прогнозировании энергоснабжения региона // Региональная экономика: теория и практика. 2015. №1. С. 36-43.
3. Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю., Мазурова О.В. Долгосрочное прогнозирование спроса на топливо на региональных энергетических рынках с учетом неопределенности // Всерос. конференция «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление»: труды. Иркутск, 1-3 сентября 2015 г. Режим доступа: [www.sei.irk.ru/energy21](http://www.sei.irk.ru/energy21) (дата обращения: 01.01.2016)
4. Кононов Ю.Д., Любимова Е.В., Тыртышный В.Н. Проблемы оценки народнохозяйственных последствий долгосрочных стратегий развития энергетики // Экономика и математические методы. 1983. Т. 19, № 5. С. 912-916.
5. Кононов Ю.Д., Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. и др. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики. Новосибирск: Наука. 2009. 178 с.
6. Кононов Ю. Д., Тыртышный В. Н. Оценка влияния характера неопределенности будущих условий на конкурентоспособность вариантов топливоснабжения // Энергетическая политика. 2011. №4. С. 90-94.
7. Кононов Ю.Д. Пути повышения обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК. Новосибирск: Наука. 2015. 147 с.
8. Макаров А.А. Системные исследования развития энергетики. М.: Издательский дом МЭИ. 2015. 280 с.
9. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Новосибирск: Наука. 1979. 414 с.
10. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование / Н.И. Воропай, С.В. Подковальников, В.В. Труфанов и др.; отв. ред. Воропай. Новосибирск: Наука. 2015. 448 с.
11. Проект Энергостратегии Российской Федерации на период до 2035. Министерство энергетики РФ. Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/node/1920>. (дата обращения: 01.01.2016)
12. Филиппов С.П. Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 4. С. 41-55.
13. SCANNER. Модельно-информационный комплекс / ред. А.А. Макаров. М.: ИНЭИ РАН. 2011. 72 с.
14. Mantzos L., Capros P. The PRIMES. Version 2. Energy System Model: Design and features. Режим доступа: <http://www.e3mlab.ntua.gr/manuals/PRIMES1d.pdf> (дата обращения: 01.01.2016)

15. The National Energy Modeling System / Industrial Demand Module Washington: Energy Information Administration. Режим доступа: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/industrial.pdf> (дата обращения: 01.01.2016)

UDK 621.11:338.27

## SET OF MODELS FOR LONG-TERM FORECASTING OF MARKET ENERGY DEMAND

**Elena V. Gal'perova**

Ph.D., Associate Professor, Leading Researcher

Department «Relationship between Energy and Economy»

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia, e-mail: [galper@isem.irk.ru](mailto:galper@isem.irk.ru)

**Abstract.** The article presents advantages of a methodological tool as a set of individual models. This tool is used for long-term market energy demand forecasting. Description of the set of models and possibility of their using for problems solving are shown. The article contains the experimental results of evaluation of price elasticity of gas demand for Russian regions in 2020 and 2030 under different assumptions about nature of future conditions uncertainty.

**Keywords:** model, optimization, forecasting, uncertainty, Monte-Carlo, the elasticity of demand, price, energy supply system.

### References

1. Gal'perova E.V. Osobennosti prognozirovaniya jenergotrebleniya na regional'nom urovne. [Features of regional energy consumption forecasting] // Izvestiya RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2004. No. 4. Pp. 61-66. (in Russian).
2. Gal'perova E.V., Kononov D.Ju. Odin podhod k ocenke vliyanija neopredelennosti ishodnyh dannyh pri dolgosrochnom prognozirovanii jenergosnabzheniya regiona [An approach to the study of the impact of input data uncertainty on long-term forecasting regional energy supply] // Regional'naja jekonomika: teorija i praktika = Regional economics: theory and practice. 2015. No. 1. Pp. 36-43. (in Russian).
3. Gal'perova E.V., Kononov D.Ju., Mazurova O.V. Dolgosrochnoe prognozirovanie sprosa na toplivo na regional'nyh jenergeticheskikh rynkah s uchetom neopredelennosti [Long-term forecasting fuel demand on the regional energy market under uncertainty] // Proc. Sci. Conf. «Russian Energy in the XXI century. Innovative development and management». Irkutsk. 1-3 September, 2015: Proceedings. Available at: [www.sei.irk.ru/energy21](http://www.sei.irk.ru/energy21), (accessed: 01.01.2016) (in Russian).
4. Kononov Ju.D., Ljubimova E.V., Tyrtshnyj V.N. Problemy ocenki narodnohozjajstvennyh posledstvij dolgosrochnykh strategij razvitija jenergetiki [Problems of assessment of economic consequences of long-term energy strategies] // Jekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods. 1983. vol. 19. No. 5. Pp. 912-916 (in Russian).

5. Kononov Ju.D., Gal'perova E.V., Kononov D.Ju. i dr. *Metody i modeli prognoznyh issledovanij vzaimosvjazej jenergetiki i jekonomiki* [Methods and models of forecasting studies the relationships between energy and the economy]. Novosibirsk: Nauka Publ. 2009. 178 p. (in Russian).
6. Kononov Ju. D., Tyrtysnyj V. N. *Ocenka vlijaniya haraktera neopredelennosti budushhih uslovij na konkurentosposobnost' variantov toplivosnabzhenija* [Assessment of the nature of the uncertainty of future conditions on the competitiveness of fuel supply options] // *Jenergeticheskaja politika = Energy policy*. 2011. No. 4. Pp. 90-94. (in Russian).
7. Kononov Ju.D. *Puti povysheniya obosnovannosti dolgosrochnyh prognozov razvitija TJeK* [Ways to improve the validity of long-term forecasts of Energy]. Novosibirsk: Nauka Publ. 2015. 147 p. (in Russian).
8. Makarov A.A. *Sistemnye issledovaniya razvitija jenergetiki* [System studies of energy development]. M.: Izdatel'skij dom MJeI = Moscow, Publishing House MEI. 2015. 280 p. (in Russian).
9. Melent'ev L.A. *Sistemnye issledovaniya v jenergetike* [System Research in the energy sector.]. Novosibirsk: Nauka Publ. 1979. 414 p. (in Russian).
10. *Obosnovanie razvitija jelektrojenergeticheskikh sistem: Metodologija, modeli, metody, ih ispol'zovanie* [Rationale for the development of electric power systems: methodology, models, methods and their use]. Novosibirsk: Nauka Publ. 2015. 448 p. (in Russian).
11. *Proekt Jenergostrategii Rossijskoj Federacii na period do 2035*. [The project Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035] / Ministerstvo jenergetiki RF = Ministry of Energy. Available at: <http://minenergo.gov.ru/node/1920> (accessed: 01.01.2016) (in Russian).
12. Filippov S.P. *Prognozirovanie jenergotreblenija s ispol'zovaniem kompleksa adaptivnyh imitacionnyh modelej* [Energy forecasting using a complex adaptive simulation models]// *Izvestija RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2010. No. 4. Pp. 41–55. (in Russian).
13. *SCANNER. Model'no-informacionnyj kompleks* [Model-information complex]. M.: INJeI RAN = Moscow: ERI RAS Publ. 2011. 72 p. (in Russian).
14. Mantzos L., Capros P. *The PRIMES. Version 2. Energy System Model: Design and features*. Available at: <http://www.e3mlab.ntua.gr/manuals/PRIMES1d.pdf> (accessed: 01.01.2016).
15. *The National Energy Modeling System / Industrial Demand Module* Washington: Energy Information Administration. Available at: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/industrial.pdf> (accessed: 01.01.2016).

**Acknowledgments.** The article is supported by grants of the Russian Foundation for Basic Research (№ 16-0600091 and №. 16-0600230).

## ЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**Исаева Ольга Сергеевна**

К.т.н., старший научный сотрудник,

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

660036, г. Красноярск, ул. Академгородок 50, стр. 44, e-mail: [isaeva@icm.krasn.ru](mailto:isaeva@icm.krasn.ru)

**Грузенко Евгений Андреевич**

Младший научный сотрудник,

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

660036, г. Красноярск, ул. Академгородок 50, стр. 44, e-mail: [Gruzenko@icm.krasn.ru](mailto:Gruzenko@icm.krasn.ru)

**Аннотация.** В работе рассматривается метод построения модели функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата. Для проектирования модели используется эвристический подход, позволяющий выполнять упорядоченный выбор преобразований модели на основе дерева допустимых изменений, определяющих переходы от текущего состояния модели к последующим состояниям. Для выбора наилучшего пути по дереву изменений модели вводится оценка эффективности и адекватности, выполняется прогноз влияния отдельных ее элементов на достижение целей моделирования.

**Ключевые слова:** бортовая аппаратура командно-измерительной системы космического аппарата, имитационное моделирование, телекоманды, телеметрия.

**Введение.** В современном мире технологии компьютерного моделирования становятся неотъемлемой частью исследования сложных технических систем. Применение аналитических методов требует существенного упрощения постановки задачи, что может в некоторых случаях приводить к уменьшению достоверности получаемых результатов [10]. Имитационное моделирование позволяет, основываясь на совместном рассмотрении исследуемого объекта и процесса его функционирования, изучать взаимодействие и взаимосвязь отдельных компонентов системы, как между собой, так и с внешней средой [3, 11]. Наиболее актуальным использование моделирования становится в тех отраслях, где проведение экспериментальных исследований сопряжено с экономическими и технологическими трудностями [5]. Так, например, не существует универсальных проектных решений для построения и технического обеспечения бортовой аппаратуры космического аппарата. Разработка способов организации функционирования и взаимодействия бортовых систем характеризуется большой вариативностью. Это связано с широким спектром назначения и условий использования космических аппаратов, постоянным увеличением требований к надежности и сроку их активного существования. Интуитивные и недостаточно обоснованные проектные решения могут привести к снижению эффективности и надежности проектируемого оборудования. В этом случае моделирование позволяет наглядно проводить имитационные эксперименты, анализировать и модифицировать конструкторские проекты, что сокращает время разработки и повышает качество технических решений. Европейской

кооперацией по стандартизации в области космической техники разработан ряд стандартов, рекомендуемых для применения технологии компьютерного моделирования для сопровождения различных этапов реализации космических проектов [17, 18]. В работе рассматривается метод построения модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата.

**1. Описание объекта моделирования.** Бортовая аппаратура командно-измерительной системы предназначена для измерения параметров движения космического аппарата, приема и передачи различных видов информации, формирования и отправки на космический аппарат команд и программ управления, стандартных частот и сигналов времени для синхронизации работы бортового комплекса управления [8, 9]. Поддержка решения конструкторских задач включает стадии проектирования бортовой аппаратуры, определения ключевых принципов функционирования, моделирования и анализа работы оборудования, подготовки отчетных документов, и другие виды работ. Модели, необходимые для поддержки конструирования, должны достоверно описывать моделируемую систему, отображать существенные стороны объекта-оригинала, они должны строиться с необходимым уровнем детализации и соответствовать целевому назначению [11]. Структура командно-измерительной системы представляет собой определенную конфигурацию функциональных блоков и коммутационных связей. Основными элементами командно-измерительной системы, которые следует учитывать при моделировании, являются: приемник (ПРМ), передатчик (ПРД), интерфейсный модуль командно-измерительной системы (МИ КИС). Внешнее взаимодействие командно-измерительной системы осуществляется с бортовыми системами в составе: бортовой цифровой вычислительный комплекс (БЦВК), бортовой комплекс управления (БКУ) и бортовая аппаратура телесигнализации (БАТС) и наземным комплексом управления. Информационное взаимодействие осуществляется с помощью двух типов данных: телекоманд и телеметрии, заданных в соответствии со стандартами Европейского космического агентства. Стандарт ESAPSS-04-107 [15] предназначен для передачи телекоманд, а стандарт ESAPSS-04-106 [14] – для телеметрии. Телекоманды передаются из центра управления полетами на борт космического аппарата. Приемник принимает пакеты команд и передает их в интерфейсный модуль командно-измерительной системы, который, в свою очередь, обрабатывает команды и в зависимости от назначения каждой из них вырабатывает соответствующую реакцию. Телеметрия представляет собой поток данных, передаваемый с борта космического аппарата на землю. Интерфейсный модуль командно-измерительной системы непрерывно, с заданной периодичностью отправляет запрос бортовой аппаратуре телесигнализации для получения телеметрической информации. Бортовая аппаратура телесигнализации обрабатывает запрос и возвращает пакет, содержащий телеметрию борта, которая дополняется телеметрией от командно-измерительной системы. Построенная телеметрия возвращается передатчиком в наземный комплекс управления.

**2. Описание модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы.** В работе используются принципы пошагового моделирования, обеспечивающие постепенное приближение модели к объекту-оригиналу (технология системного моделирования [6], метод пошагового приближения [10] и др.). Для построения модели  $S$ , которая представляет собой образ системы-оригинала  $S^0$ , вводится моделирующее отображение  $f: S=f(S^0)_V$  в соответствии

с целевым назначением  $V$ . Моделирующее отображение  $f$  представляется в виде композиции двух отображений – огрубляющего  $q$  и гомоморфного  $r$ , то есть  $q(S^0)=S^1$ ,  $r(S^1)=S$ ,  $r(q(S^0))_V=S$ , где  $S^1$  – модель  $S^0$ . Таким образом, исходная система представляет собой с одной стороны упрощенный образ оригинала, а с другой стороны, точно передает состояние и функции исходной системы в рамках свойств и характеристик, необходимых для удовлетворения целей ее построения. В нашем случае аналитически описать моделирующие отображения не представляется возможным. Модель описывается через множество ее состояний:  $S = \langle G, I, P \rangle$ , где  $G$  – множество элементов структуры системы (приемник, передатчик, бортовые системы и др.),  $I$  – множество параметров,  $P$  – методы функционирования. Моделирующее отображение  $q$  предназначено для построения множеств  $G$  и  $I$ , оно выполняет упрощение системы  $S^0$  путем исключения компонентов структуры и коммутационных связей, несущественных для целей моделирования. Гомоморфное отображение  $r$ , применяемое к упрощенной структуре  $S^1$ , предназначено для описания методов работы модели (множество  $P$ ). Методы функционирования задаются в виде правил изменения состояния модели. Правило представляет собой символическую конструкцию вида: «Если  $A$  то  $B$ » [4]. Его левая часть задает условие выполнения, а правая часть – действия, осуществляющие изменение состояния модели. Правило  $P(X, W, T) = Y$ , где  $X, W, Y \subseteq I$ ;  $X$  – множество входных воздействий: команды, импульсы, сигналы, запросы;  $W$  – множество воздействий внешней среды: изменение параметров функционирования, моделирование нештатных ситуаций;  $Y$  – множество наблюдаемых параметров,  $T$  – моменты времени наблюдения. Такой подход получил широкое применение в различных системах проектирования и технического конструирования, он позволяет не только получать качественные решения, но и обмениваться знаниями между группами инженеров, имеющими большой опыт в различных аспектах решаемых задач [12].

**3. Программное обеспечение для моделирования функционирования бортовой аппаратуры.** Для выполнения имитационного моделирования разработано программное обеспечение – Программно-математическая модель бортовой аппаратуры командно-измерительной системы [7]. Программное обеспечение включает подсистему интерфейсного и графического сопровождения прикладных задач и интеллектуальную подсистему имитационного моделирования [13] функционирования бортовой аппаратуры. Оно позволяет в простой и наглядной форме описывать аппаратную часть командно-измерительной системы, выполнять визуальную конфигурацию элементов модели, коммутационных интерфейсов, связей и параметров моделируемого оборудования. Простой пример информационно-графической модели, которая имитирует информационное взаимодействие между интерфейсным модулем командно-измерительной системы (МИ КИС), бортовым комплексом управления (БКУ) и бортовой аппаратурой телесигнализации (БАТС), представлен на рисунке (рис. 1). Дуги на рисунке обозначают направления информационного обмена при передаче команд и телеметрии.

В зависимости от назначения космического аппарата и особенностей работы оборудования функции командно-измерительной системы моделируются различными наборами команд и действий, представленных в продукционной базе знаний. База знаний имеет внешнее представление, предназначенное для работы пользователя в терминах предметной области и внутреннее представление, обеспечивающее логический вывод и управление состоянием модели. Она выступает в качестве хранилища функциональных и

технологических процессов, позволяя не только наблюдать, но накапливать существенную информацию о проектируемом объекте [19].

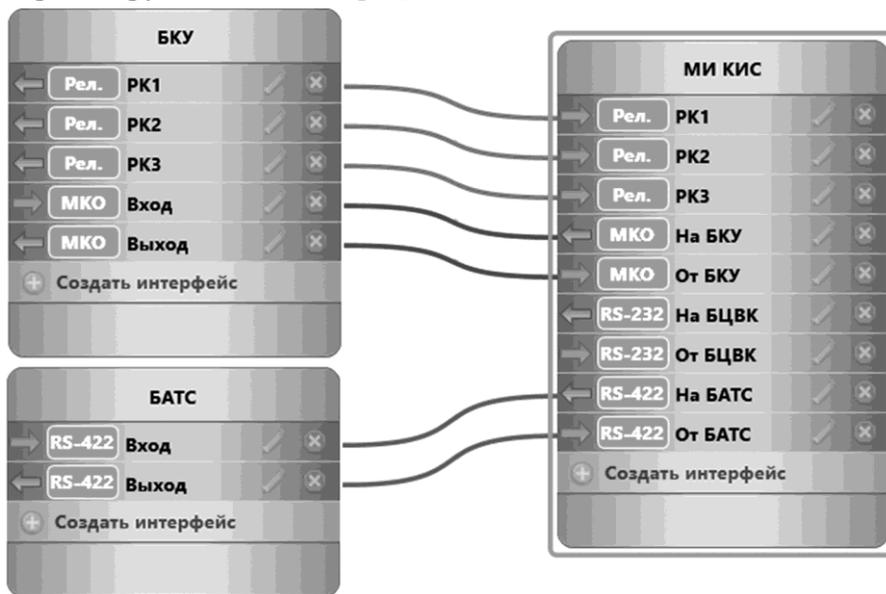


Рис. 1. Пример информационно-графической модели

Фрагмент базы знаний, описывающий методы функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы показан на рисунке (рис. 2). В базе знаний созданы правила общего назначения, правила работы элементов модели, выдачи командной и командно-программной информации на системы космического аппарата, приема и выдачи телеметрической информацией, правила управления по командам, контроля состояния бортовой аппаратуры, задания режимов и интерфейсов для работы оборудования и пр.

#### Правило №1



**Если** по интерфейсу 'От ПРМ №1' получены данные

И 6 бита(ов) , начиная с 16-го в массиве, полученном по интерфейсу 'От ПРМ №1', равны 0 0 0 0 0 1

И 6 бита(ов) , начиная с 42-го в массиве, полученном по интерфейсу 'От ПРМ №1', равны 0 0 0 0 0 1

**То** записать данные, полученные по интерфейсу 'От ПРМ №1', в поле 'Структура пакета РК БУ БКУ' переменной 'Принятая РК БУ БКУ'

И передать значение поля 'Поле данных сегмента' переменной 'Принятая РК БУ БКУ' по интерфейсу 'На БУ БКУ'

И запустить таймер 'Ожидание квитанции от БУ БКУ'

И установить значение переменной 'Номер передачи РК' равным 1

Рис. 2. Фрагмент базы знаний

Имитация функционирования модели осуществляется путем пошагового или автоматического изменения ее состояния в соответствии с заданными в базе знаний правилами. Для этого в процессе логического вывода [16] выбираются правила, применимые к текущему состоянию модели, выполняются действия и визуализируется выполнение команд, имитируются процессы формирования и передачи пакетов данных. В графическом представлении каждая передача данных сопровождается анимационными эффектами.

Интерактивный процесс моделирования позволяет конструктору проводить имитационные эксперименты, которые способствуют пониманию рассматриваемой системы [20]. Изменение параметров приема, передачи данных, времени ожидания ответов и квитанций, переключение активности коммутационных интерфейсов и элементов модели позволяют выполнять анализ нештатных ситуаций.

Все события модели журналируются с возможностью их просматривать, группировать или детализировать. Журналы позволяют конструктору исследовать, как и почему система выполняет то или иное действие и могут способствовать пониманию, как нужно изменить модель для достижения требуемого функционирования. Построение модели, отвечающей целям моделирования, требует многократного изменения ее конфигурации и функций. В этой связи остается нерешенным вопрос о создании метода направленного проектирования, результатом работы которого являлась бы модель, представляющая собой упрощенное наглядное описание командно-измерительной системы, достоверно имитирующая ее свойства и особенности поведения.

**4. Алгоритм построения модели командно-измерительной системы.** Алгоритм построения модели приведен на рисунке (рис. 3). Он предполагает пошаговое приведение начального состояния модели  $S^1$ , отображающего лишь некоторые функции исходного объекта, к состоянию  $S$ , подобному системе-оригиналу  $S^0$  в соответствии с целевым назначением  $V$ .

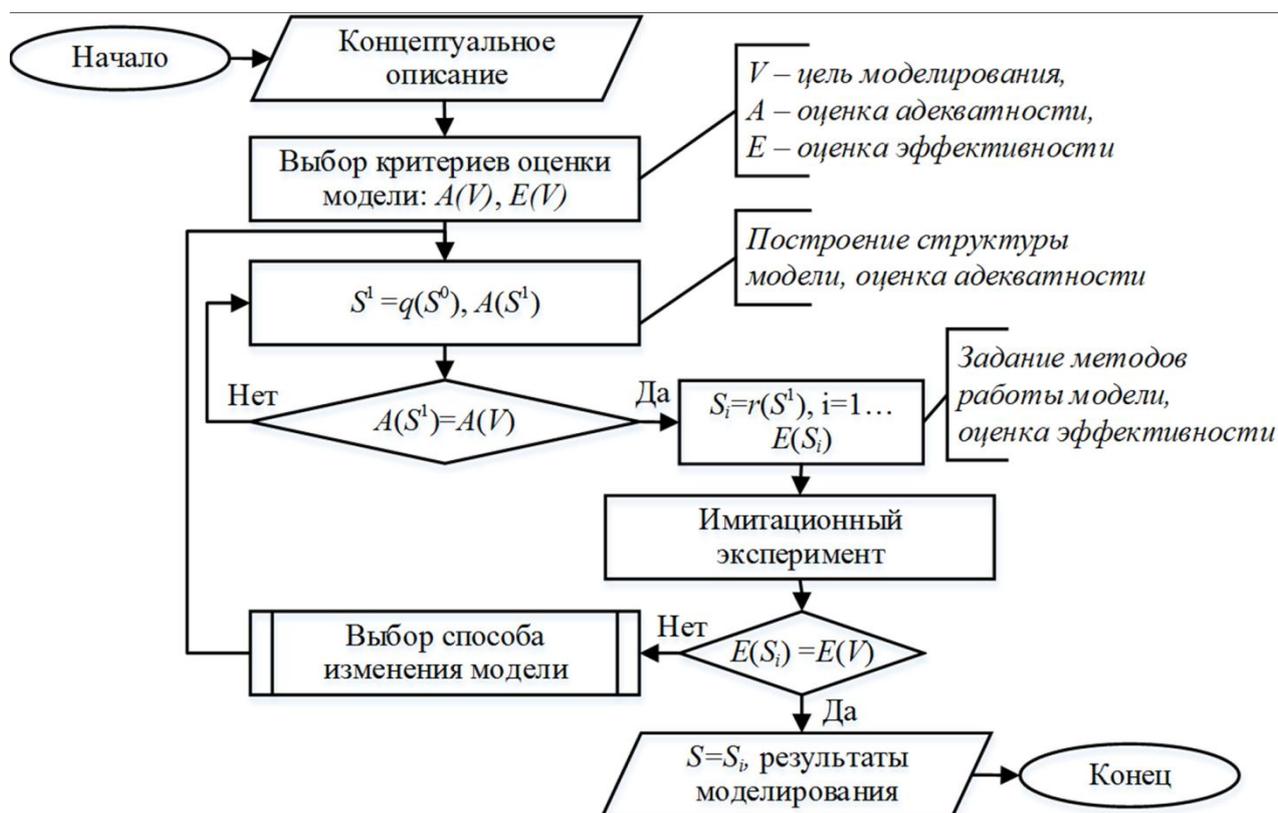


Рис. 3. Алгоритм построения модели

Алгоритм начинается с построения концептуального описания модели, сбора и консолидации исходной информации о назначении, характеристиках, условиях и способах работы моделируемой системы. Далее выполняется выбор критериев для оценки адекватности и эффективности модели.

Адекватность модели  $A(S)$  представляет собой оценку конфигурации модели и определяется по соответствию структуры модели системе-оригиналу. Например, адекватность может определяться как степень наглядности (простоты) модели и задаваться линейной функцией от структуры модели, выраженной в виде:

$$A(S)=a*N_a+b*N_b+c*N_c,$$

где коэффициенты  $a, b, c \leq 1$ ,  $N_a$  – количество блоков модели  $S$ ,  $N_b$  – количество интерфейсов,  $N_c$  – количество коммутационных связей.

Эффективность определяется, как степень соответствия методов работы модели целям моделирования, и представляет собой эвристическую функцию, выраженную в виде количественных или качественных (экспертных) оценок. Примеры показателей для оценки эффективности: «Управляемость» – возможность задавать нужные параметры (% неудач); «Пропускная способность» – количество выполняемых действий в единицу времени; «Время реакции» – среднее время прохождения команд, телеметрии; «Задержки передачи» – максимальное и минимальное время задержки передачи данных; «Целостность» – оценка взаимодействия элементов модели в виде единой системы; «Путь» – длина пути или количество различных маршрутов, описывающих передачу данных от входа к выходу; «Потери» – процент потерь пакетов при моделировании; «Отказоустойчивость» – количество ошибок модели в нештатных ситуациях; «Надежность» – оценка надежности структуры и др.

На следующем шаге алгоритма выполняется формирование базы знаний, описывающей логику поведения структурных элементов модели, и определяются особенности функционирования всей системы в целом. Проводится имитационный эксперимент, по результатам которого принимается решение о корректировке модели. Для выбора наилучшей последовательности преобразования модели применяется дерево допустимых изменений, определяющих переходы от текущего состояния модели к последующим состояниям. Пример дерева показан на рисунке (рис. 4).

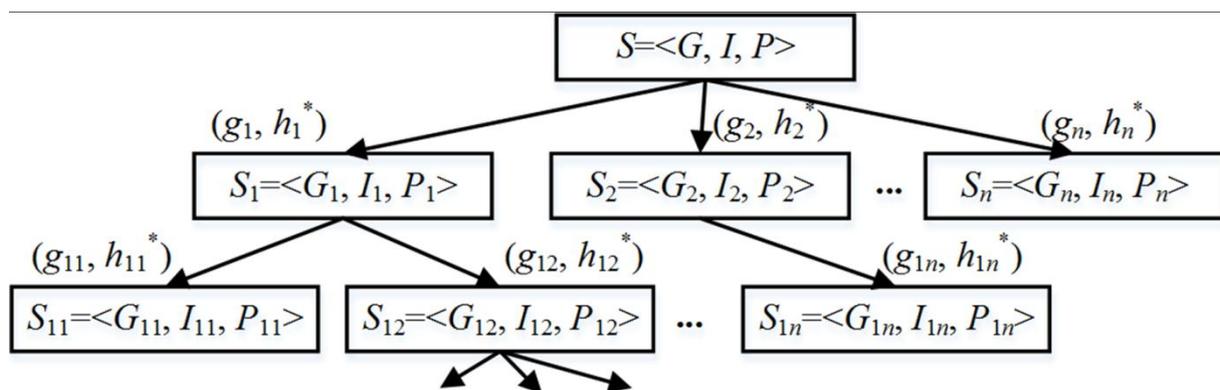


Рис. 4. Дерево выбора изменений модели

Первый уровень дерева содержит изменения элементов структуры модели и методов их функционирования на один шаг. Каждое последующее преобразование отображается отдельной ветвью. Дерево строится на несколько уровней в глубину, выполняется оценка полученных вариантов, на основе которой развивается наиболее перспективная ветвь дерева. Для сокращения дерева изменений и выбора наилучшего варианта модели применяется алгоритм эвристического поиска. Пусть имеется начальная модель  $S^1$ , каждое изменение модели обозначим через  $S^i$  ( $i=2, \dots, n$ ). Требуется найти модель  $S^n$ , удовлетворяющую

заданным критериям адекватности и эффективности. Для упорядоченного поиска будем использовать алгоритм  $A^*$  [16]. Введем эвристическую функцию оценки узлов в дереве изменений:  $f(S^i) = g(S^i) + h^*(S^i)$ ,  $g(S^i)$  – стоимость наилучшего пути от  $S^1$  к  $S^i$ ,  $h^*(S^i)$  – предполагаемая стоимость предстоящего пути к целевому состоянию модели – определяется как степень близости модели  $S^i$  к целевому состоянию модели  $S^n$ . На каждом шаге алгоритма требуется выбрать путь по дереву, обеспечивающий лучшие показатели адекватности и эффективности модели. В нашем случае функция  $g$  будет оценкой соответствия структуры модели относительно целевого представления  $V$ . Функция  $g$  имеет вид:  $g(S^i) = A(S^i)/A(V)$ , где  $A$  – оценка адекватности, выбранная на начальном этапе построения модели. Эвристическая функция  $h^*$  задается в виде:  $h^*(S^i) = E(S^i)/E(V)$ , где  $E$  – выбранная оценка эффективности модели. Показатель эффективности модели строится на основе одного или нескольких критериев, вносящих равнозначный вклад в общее решение. При необходимости построения более сложной многокритериальной оценки модели можно использовать генетический алгоритм [6]. Дополнительно может применяться стратегия поиска в глубину на несколько шагов и выбора из построенного поддеревья лучшей модели.

После внесения изменений в модель проводится новый эксперимент, по результатам которого принимается решение о необходимости корректировки модели. Построенная таким образом модель командно-измерительной системы может лишь асимптотически приближаться к оригиналу, но за счет упрощения структуры позволяет повысить наглядность и качество полученного решения и в каждом практическом случае выполнять моделирование с заданной степенью детализации.

**Заключение.** Разработанные методы построения модели и программное обеспечение, предназначенное для решения задач информационно-графического и имитационного моделирования функционирования бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата, внедрены в организации – разработчике спутниковых систем. Программное обеспечение содержит расширенные функции настройки модели, ведения и хранения статистики моделирования, управления имитационными экспериментами, а также анализа результатов работы модели. Эти функции позволяют вводить различные эвристические оценки модели для направленного ее построения, конфигурации элементов и задания методов работы. Рассмотрены решения задачи ограничения перебора альтернативных вариантов для изменения модели. Программное обеспечение позволяет проводить многократные испытания модели с различными наборами входных данных и определять влияние изменяющихся условий функционирования на результаты имитационного моделирования. При моделировании выполняется визуализация последовательности действий, определенная для конкретной конфигурации модели. Программное обеспечение выступает как интеллектуальный партнер конструктора при проектировании, построении и анализе конструкторских решений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 16-41-242042.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брукс Ф. П. Проектирование процесса проектирования. М: «Вильямс». 2014. 464 с.
2. Замятина О. М. Моделирование систем. Томск: Изд-во ТПУ. 2009. 204 с.

3. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. СПб.: Питер. 2004. 847 с.
4. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 864 с.
5. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. 336 с.
6. Новосельцев В.И., Тарасов Б.В., Голиков В.К., Демин Б.Е. Теоретические основы системного анализа. М.: Майор. 2006. 592 с.
7. Ноженкова Л.Ф., Исаева О.И., Грузенко Е.А. Построение программно-математической модели бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата // Информатизация и связь. 2014. Выпуск 1. С. 87-93.
8. Разработка командно-измерительной системы для перспективных КА на базе платформы «Экспресс-4000». Железногорск. 2012.
9. Системы и комплексы космические. Термины и определения. ГОСТ Р 53802-2010. М: Стандартинформ. 2011. 28 с.
10. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Высшая школа. 2009. 343 с.
11. Хорошев А.Н. Управление решением проектных задач на предприятии // Современные научные исследования и инновации. 2011. № 7. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2011/11/4940>.
12. Hernandez, J.A. & Peters, T.J. and et al., Intelligent Decision Support for Assembly System Design, The Third Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence: The AAAI Press. Menlo Park, California. 1991.
13. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment // Proceedings series Advances in Computer Science Research. Vol.18. 2015. Pp. 943-945.
14. Packet Telemetry Standard ESA PSS-04-106. Issue 1: European space agency (ESA). 1988. 73 p.
15. Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107. Issue 2: European space agency (ESA), 1992. 166 p.
16. Russell S.J., Norvig P Artificial Intelligence: A Modern Approach // Prentice Hall. 2010. 1152 p.
17. Space engineering. System modelling and simulation// ESA Requirements and Standards Division ESTEC. 2010. 80 p.
18. Space engineering. System engineering general requirements ECSS-E-ST-10C. Netherland: «ESA publication division». 2009. 100 p/
19. Stanley, G.M., Experiences using knowledge-based reasoning in online control systems, International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium on Computer Aided Design in Control Systems. July 15-17, 1991. Swansea. UK.
20. System Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II: Ptolemy.org. 2014. URL: <http://ptolemy.org/systems>.

## HEURISTIC METHOD OF CONSTRUCTING A MODEL OF SPACECRAFT COMMAND AND MEASURING SYSTEM

**Olga S. Isaeva**

Ph.D., Senior researcher, Institute of computational modelling SB RAS,  
50/44, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: isaeva@icm.krasn.ru

**Evgeny A. Gruzenko**

Junior researcher, Institute of computational modelling SB RAS, 50/44, Akademgorodok,  
660036, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: Gruzenko@icm.krasn.ru

**Abstract.** This article presents the method of design model functioning spacecraft onboard equipment. To build the model uses a heuristic approach that allows you to perform ordered selection of method of transformation of models. The method based on the tree of acceptable change, defining transitions from a current state model to a subsequent state. To choose the best path through the tree changes applied to evaluate the efficiency and adequacy. Considered the influence of the elements for purposes of modeling.

**Keywords:** spacecraft, onboard equipment, command and measuring system, simulation modeling, telecommands, telemetry

The research was sponsored by RFBR and the Krasnoyarsk Territory Government in the framework of a research project № 16-41-242042.

### References

1. Brooks F.P. Proektirovanie processa proektirovaniya [Design of process of design]. Moscow "Williams". 2014. 464 p. (in Russian).
2. Zamyatina O.M. Modelirovanie sistem [Modeling of systems]. Tomsk: TPU publ. 2009. 204 p. (in Russian).
3. Kelton V., Lowe And. Imitacionnoe modelirovanie [Imitating modeling]. Classics of CS. 3rd prod. SPb. St. Petersburg/ 2004. 847 p. (in Russian).
4. Lugger D. Iskustvennyi intellekt: strategii i metodi resheniya slozhnykh problem [Artificial intelligence: strategy and methods of the solution of complex problems]. 4th edition. Moscow "Williams". 2003. 864 p. (in Russian).
5. Mikrin E.A. Bortovye kompleksi upravleniya kosmicheskimi apparatami i proektirovanie ih programmnoho obespecheniya [Onboard complexes of control of spacecrafts and design of their software]. Moscow. MGTU of N.E. Bauman. 2003. 336 p. (in Russian).
6. Novoseltsev V.I., Tarasov B.V., Golikov V.K., Dyomin B.E. Teoreticheskie osnovy sistemnogo analiza [Theoretical bases of the system analysis]. Moscow. Major. 2006. 592 p. (in Russian).
7. Nozhenkova L.F., Isaeva O.I., Gruzenko E.A. Postroenie programmno-matematicheskoi modeli bortovoi apparatury komandno-izmeritelnoi sistemi kosmicheskogo apparata [Designing the program-mathematical model for the spacecraft command and measuring system] // Informatization and communication. 2014. №1. Pp. 87-93. (in Russian).

8. Rasrabotka komandno-izmeritelnoi sistemi dla perspektivnih kosmicheskikh apparatov na base platformi «Ekspress-4000» [Development of command and measuring system for perspective spacecraft based on the Express-4000 platform]. Zheleznogorsk. 2012. (in Russian).
9. Sistemi i kompleksi kosmicheskie [Systems and space complexes. Terms and determinations]. GOST P 53802-2010. Moscow. Standartinform. 2011. 28 p. (in Russian).
10. Sovetov B.I., Yakovlev S.A. Modelirovanie system [Modeling of systems]. Moscow. The higher school. 2009. 343 p. (in Russian).
11. Horoshev A.N. Upravlenie resheniem proectnih zadach na predpriatii [Management of the solution of project tasks at the entity] // Modern scientific researches and innovations. 2011. No. 7. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2011/11/4940>. (in Russian).
12. Hernandez, J.A. & Peters, T.J. and et al., Intelligent Decision Support for Assembly System Design, The Third Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence: The AAAI Press. Menlo Park. California. 1991.
13. Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E. Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment // Proceedings series Advances in Computer Science Research. Vol.18. 2015. Pp. 943-945.
14. Packet Telemetry Standard ESA PSS-04-106. Issue 1: European space agency (ESA). 1988. 73 p.
15. Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107. Issue 2: European space agency (ESA). 1992. 166 p.
16. Russell S.J., Norvig P Artificial Intelligence: A Modern Approach // Prentice Hall. 2010. 1152 p.
17. Space engineering. System modelling and simulation// ESA Requirements and Standards Division ESTEC, 2010. 80 p.
18. Space engineering. System engineering general requirements ECSS-E-ST-10C. Netherland: «ESA publication division», 2009. – 100 p.
19. Stanley, G.M., Experiences using knowledge-based reasoning in online control systems, International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium on Computer Aided Design in Control Systems. July 15-17, 1991. Swansea. UK.
20. System Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II: Ptolemy.org. 2014. URL: <http://ptolemy.org/systems>.

УДК 62.752, 621:534.833, 888.6

## **ВИРТУАЛЬНЫЕ РЫЧАЖНЫЕ СВЯЗИ: ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

**Елисеев Сергей Викторович**

Д.т.н., директор Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского 15, e-mail: eliseev\_s@inbox.ru

**Кашуба Владимир Богданович**

К.т.н., доцент, первый проректор, Братский государственный университет 665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, e-mail: nauka@brstu.ru

**Ковригина Инна Владимировна**

К.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», Забайкальский институт железнодорожного транспорта, филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, 672040, г. Чита, ул. Магистральная 11, e-mail: fominainna@rambler.ru

**Кинаш Никита Жданович**

Начальник отдела экспертизы и мониторинга внедрения технологий и инноваций в проекты Московского инженерного центра, Московская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», 107996, г. Москва, ул. Краснопрудная, д. 20, e-mail: kinashnikita@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы обоснования проявлений рычажных связей в механических колебательных системах. Показано, что рычажные связи находят отражение в структуре выражений для кинетической и потенциальной энергий. В линейных механических системах с двумя степенями свободы построены аналитические соотношения и структуры, определяющие особенности и формы рычажных связей. Вводится понятие о виртуальной рычажной связи, которая реализуется через соотношение параметров движения системы, но не принимает явных форм рычажных механизмов. Предлагается метод построения математических моделей с учетом рычажных связей и структуры исходной системы.

**Ключевые слова:** рычажные связи, виртуальные рычаги, структурные схемы, передаточные отношения, структуры.

**Введение.** Расширение набора элементов, используемых для построения расчетных схем технических объектов, инициирует внимание к формированию представлений о возможностях появления новых видов связей между элементами систем и преобразовании структур [14, 15, 19, 20].

Определенные преимущества в решении задач динамики, связанных с оценкой, контролем и управлением динамическим состоянием, обладают методы структурного математического моделирования [2, 17, 18, 21].

Развиваемые подходы в структурном моделировании основаны на использовании динамических аналогий процессов, протекающих в электрических и механических цепях, а также в системах автоматического управления [2, 7, 8]. В рамках таких представлений

механической колебательной системе сопоставляется структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления с последующим использованием аналитического аппарата теории автоматического управления.

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы обоснования и формы проявления рычажных связей в механических колебательных системах на основе использования методов структурного математического моделирования.

**1. Некоторые общие положения.** Теоретические положения структурной теории достаточно подробно рассмотрены в работах [2, 17, 18, 21]. Вместе с тем реализация некоторых приложений концепции введения дополнительных связей требует учета ряда особенностей.

Во-первых, структурная схема ВЗС строится на основе предварительно полученных дифференциальных уравнений движения, для составления которых используются принцип Даламбера или формализм Лагранжа [8, 17]. Поэтому существующие в структурной схеме связи имеют конкретное физическое содержание, а точки приложения силовых или кинематических возмущений на расчетной схеме однозначно соотносятся с соответствующими точками на базовых элементах структурной схемы ВЗС. Базовый элемент имеет вид звена с передаточной функцией  $W = \frac{1}{mp^2}$ . Входом такого звена является сила, а выходом – перемещение. Все остальные звенья структурной схемы ВЗС (за исключением единичной обратной связи) являются элементарными типовыми звеньями, входом которого является смещение, а выходом – сила [18].

Во-вторых, типовые элементарные звенья, в соответствии с вышеприведенным, имеют различные передаточные функции, но все они, по-существу, являются различными видами пружин, то есть все элементарные звенья ВЗС, кроме объекта защиты, могут рассматриваться в одном классе – классе обобщенных пружин. Обычная пружина представляет собой типовой элемент с передаточной функцией усилительного звена. Существуют и другие виды элементарных звеньев, что рассматривается в [2, 17, 18, 21].

В-третьих, в рамках структурной теории математического моделирования дополнительные связи вводятся в структурную схему ВЗС, главным образом, как параллельные цепи, к упругому элементу базовой модели. Таким образом, по определению, дополнительная цепь является «пружиной» [16]. Поэтому приведенная жесткость определяется, а обобщенная пружина формируется (как физическая сущность дополнительной связи) на основе правил параллельного и последовательного соединения пружин. За пределами упомянутого обстоятельства структурные схемы ВЗС и систем автоматического управления (САУ) подчиняются одним и тем же правилам структурных преобразований [7, 8, 16, 18].

В-четвертых, типовые элементарные звенья ВЗС состоят из элементарных звеньев, которые не могут быть упрощены. Все другие звенья представляют собой результат некоторой сборки [17]. Типовые звенья САУ имеют совсем другой вид и формируются на основе представлений о возможности записи сложной передаточной функции, дробно-рационального вида как результата некоторого соединения передаточных функций элементарных (типовых) звеньев САУ, в отличие от теории электрических и механических цепей [1, 6].

Приведенные различия связаны с теми обстоятельствами, что структурные схемы ВЗС строятся на основе формализованных методов составления дифференциальных уравнений, тогда как при построении структурных схем САУ используются более сложные приемы (в том числе эвристические) составления математических моделей. При этом часть уравнений отражает физические особенности исходных систем, наличие тех или иных технических средств сбора, передачи и обработки информации о динамическом состоянии объекта [17].

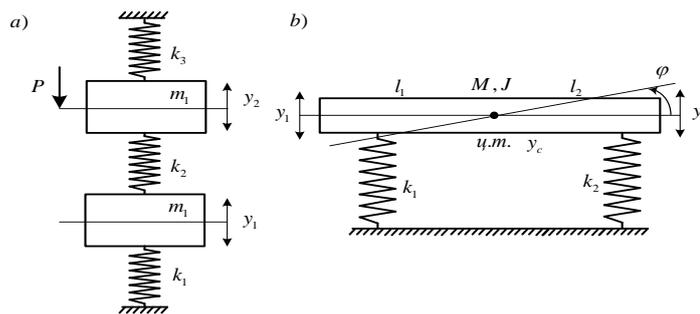
Взаимодействие твердых тел в механических колебательных системах в своей простейшей форме представлены, в первую очередь, вводимыми в технических системах рычагами и рычажными связями, которые оказывают на движение системы существенное влияние. В определенном смысле рычаги могут рассматриваться как некоторые специальные звенья колебательных структур – они обеспечивают «масштабирование» любого сигнала, то есть изменяют модуль входного сигнала. С другой стороны, может одновременно происходить не только изменение величины сигнала, но и изменение направления движения точки приложения воздействия, то есть изменяется направление, изменяется и знак передаточного отношения. В конкретных задачах это обстоятельство передачи взаимодействию должно учитываться. И, наконец, в сложных рычагах может меняться не только величина сигнала, но и его направление. Отличительной особенностью рычага является то, что в этом звене не происходят изменения физической природы сигнала, происходит лишь «геометрическое» его преобразование. В связи с этим, определяя место рычага в отношении типового набора элементарных звеньев, можно полагать, что рычажное звено является особым звеном, реализующим функции соединения элементов, обеспечивая тем самым структурную общность разветвленной структуры механической колебательной системы, в том числе и парциальных блоков, реализующих, каждый по отдельности, свой вид колебательных движений. Рассмотрение рычажных взаимодействий связано еще с одним новым обстоятельством, суть которого состоит в появлении так называемой «связности» движений [3, 13].

**2. Структура математических моделей механических колебательных систем: соотношение форм кинетической и потенциальной энергий.** Построение математических моделей для механических колебательных систем связано, как правило, с использованием уравнений Лагранжа II рода и требует составления выражения для кинетической и потенциальной энергий. Предполагается, что силы сопротивления малы. Формы выражений для энергии зависят от выбора систем обобщенных координат, по положению которых описывается динамические взаимодействия.

Расширение элементной базы современных виброзащитных систем связано не только с реализацией идей управления колебаниями с помощью активных элементов, но и с введением в структуру систем элементарных звеньев нового типа и детализацией представлений о способах и средствах соединения звеньев между собой на основе рычажных связей и механизмов [9]. Если взять обычную механическую колебательную систему, то выражения для кинетической и потенциальной энергии обычно имеют полную квадратичную форму для потенциальной энергии и неполную квадратичную форму – для выражения, определяющего кинетическую энергию системы. Выбирая соответствующие системы координат, можно осуществить инверсию и получить для выражения кинетической энергии полную квадратичную форму, а для потенциальной энергии – неполную. Решение задачи одновременного приведения выражений к неполной форме означает переход к

главным координатам, что возможно лишь для некоторых частных случаев. Получение выражений для кинетической и потенциальной энергий одновременно в полной квадратичной форме возможно, однако для этого необходимо введение дополнительных связей. По-существу, возможности приведения выражений для кинетической и потенциальной энергий к полным квадратичным формам предопределяют принципиальные возможности «легитимности» введения дополнительных обратных связей и расширение типовой элементной базы ВЗС [17, 18].

**2.1.** Если полагать, что базовые модели ВЗС существуют в виде двух вариантов, как показано на рис. 1а и 1б, то имеет смысл рассмотреть как при этом формируются выражения, для кинетической и потенциальной энергий с учетом использования представлений о квадратичных формах.



**Рис. 1.** Базовые расчетных схемы ВЗС с двумя степенями свободы: а) – цепная модель, б) – твердое тело на упругих опорах

Пусть кинетическая и потенциальная энергия ВЗС имеют вид в системе обобщенных координат  $y_1, y_2$  (рис. 1а):

$$T = \frac{1}{2}(a_{11}\dot{y}_1^2 + 2a_{12}\dot{y}_1\dot{y}_2 + a_{22}\dot{y}_2^2), \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}(c_{11}y_1^2 + 2c_{12}y_1y_2 + c_{22}y_2^2). \quad (2)$$

В соответствии с рис. 1, а

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2;$$

где

$$a_{11} = m_1; a_{22} = m_2; a_{12} = 0. \quad (3)$$

Введем в расчетную схему на рис. 1а дополнительную связь вида  $Lp^2$  между массами  $m_1$  и  $m_2$ , и определим значения коэффициентов в выражении (1). При этом выражение (3) изменит свою форму:

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}L(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2. \quad (4)$$

где  $L$  – приведенный момент инерции устройства для преобразования движения. Сделав ряд выкладок, можно записать, что

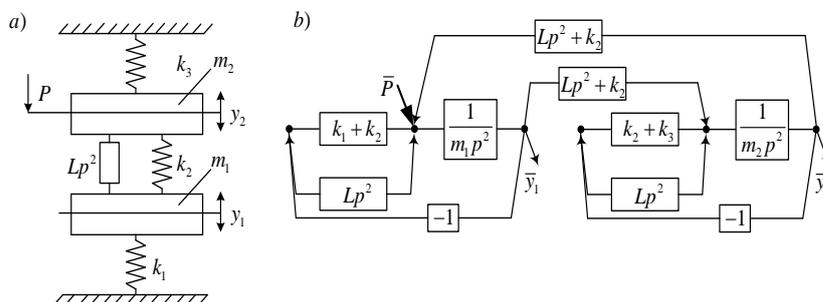
$$T = \frac{1}{2}(m_1 + L)\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}(m_2 + L)\dot{y}_2^2 - L\dot{y}_1\dot{y}_2; \quad (5)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1y_1^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_3y_2^2; \quad (6)$$

где  $a_{11} = m_1 + L; a_{12} = -L; a_{22} = m_2 + L;$  (7)

$c_{11} = k_1 + k_2; c_{12} = -k_2; c_{22} = k_2 + k_3.$  (8)

Расчетная схема базовой модели (рис. 1а) преобразуется в этом случае в механическую колебательную систему, как показано на рис. 2а и 2б.



**Рис. 2.** Расчетная схема базовой модели (рис. 1, а) при введении дополнительной связи в виде устройства для преобразования движения (а) и эквивалентная в динамическом отношении структурная схема САУ (б)

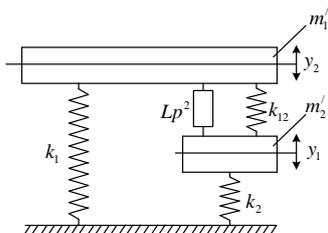
Отметим, что приведение выражения для кинетической энергии к виду (1), в котором  $a_{12} \neq 0$ , может быть осуществлено, но в этом случае должна вводиться соответствующая дополнительная связь. Одновременно происходит и преобразование перекрестных связей (рис. 1б), принимающих упруго-инерционный характер (а не чисто упругий).

**2.2.** Рассмотрим, в связи с открывающимися возможностями, формы изменения структуры выражений для кинетической энергии за счет введения дополнительной связи, и другие подходы, которые связаны с некоторыми алгебраическими преобразованиями исходных выражений (1), (2) [5].

Введем запись для потенциальной энергии в виде:

$$2\Pi = (c_{11} + c_{12})y_1^2 - c_{12}(y_2 - y_1) + (c_{22} + c_{12})y_2^2, \tag{9}$$

что соответствует расчетной схеме на рис. 3.



**Рис. 3.** Расчетная схема ВЗС с учетом преобразований Т и П

Жесткости упругих элементов (из выражения (9)) имеют вид:

$$k_1 = c_{11} + c_{12}; k_2 = c_{22} + c_{12}; k_{12} = -c_{12}. \tag{10}$$

Построение такой схемы (рис. 3) возможно не для любой положительно определенной матрицы жесткостей, поскольку должны выполняться неравенства

$$c_{11} + c_{12} \geq 0; c_{22} + c_{12} \geq 0; -c_{12} \leq 0. \tag{11}$$

В частности, для системы на рис. 1, где коэффициенты квадратичной формы потенциальной энергии определяются выражением (8), что соответствует условиям (11). В свою очередь, для кинетической энергии системы при введении дополнительной связи  $Lp^2$  можно отметить, что выражение для кинетической энергии не связано в данном случае с

выражением для потенциальной энергии. Таким образом, для системы с дополнительными связями имеем:

$$m'_1 = a_{11} + a_{12}; m'_2 = a_{12} + a_{22}; a_{12} = -L. \quad (12)$$

При этом выполняются условия (11):

$$\begin{aligned} m'_1 &= m_1 + L - L = m_1 \geq 0; \\ m'_2 &= m_2 + L - L = m_2 \geq 0; \\ a_{12} &= -L \leq 0. \end{aligned}$$

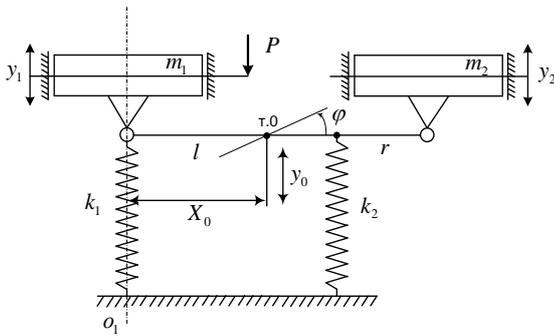
Путем соответствующих преобразований потенциальная энергия может быть разложена в сумму квадратов вида

$$2\Pi = \left( \frac{c_{12}y_1 + c_{22}y_2}{c_{22}} \right)^2 + cy_1^2 \quad (13)$$

где

$$c = \frac{c_{11}c_{22} - c_{12}^2}{c_{22}}, \quad (14)$$

что приводит к схеме, показанной на рис. 4. Отметим, что  $T$  имеет изначальное значение (то есть  $a_{12} = 0$ ), а само выражение для кинетической энергии не изменяется.



**Рис. 4.** Изменение вида расчетной схемы ВЗС при переходе к другой форме  $\Pi$  – (выражение 10)

В этом случае

$$k_1 = c; k_2 = \frac{(c_{12} + c_{22})^2}{c_{22}}; \frac{l}{r} = \frac{c_{22}}{c_{12}}. \quad (15)$$

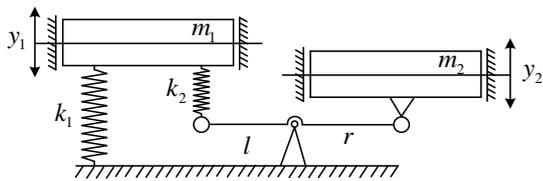
Физический смысл выражения  $k_1 = c$  заключается в том, что потенциальная энергия системы на рис. 4, может быть определена в два этапа. На первом этапе определяется приведенная жесткость в системе при  $m_2 = 0$ , что можно записать в виде

$$K_{np} = k_1 + \frac{k_2 \cdot k_3}{k_2 + k_3} = \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3}{k_2 + k_3}, \quad (16)$$

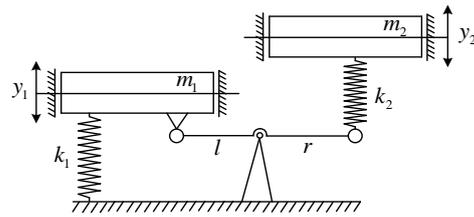
что соответствует выражению (14).

Выражение (14) отражает потенциальную энергию упругих элементов при введении «виртуального рычага» первого рода с плечами  $c_{22} = l$  и  $c_{12} = r$  [5]. Введение «виртуального рычага» требует соблюдения некоторых условностей в рассмотрении движения системы. Это связано с тем, что «виртуальный рычаг» не вносит в систему пространственных представлений, что связано, в свою очередь, с необходимостью введения понятия о центре масс и др.. Однако, такой подход очень символичен, поскольку инициирует вопрос о существовании в механических колебательных системах рычажных связей, что получило развитие в работах последних лет [4, 10, 12].

В схеме на рис. 5, в отличие от выражения (2.15)  $k_2 = \frac{c_{12}^2}{c_{22}}$ .



**Рис. 5.** Расчетная схема ВЗС с виртуальным рычагом, имеющим неподвижную точку опоры



**Рис. 6.** Расчетная схема ВЗС с введением упругого элемента  $k_2$  между рычагом и массой  $m_2$

На расчетной схеме, приведенной на рис. 6,  $k_2 = c_{22}$ . Расчетные схемы на рис. 4 – 6 имеют физический смысл: для любой положительно-определенной матрицы  $k$ , за исключением случая  $c_{22} = -c_{12}$ . Для всех случаев  $l/r < 0$  означает иное расположение точек присоединения  $m_1$  и  $m_2$  по отношению к рычагу и точкам опоры: точки присоединения масс находятся по одну сторону от точки опоры.

**3. Сравнительный анализ.** Учет реальных свойств рычажного соединения выявляет особенности движения, что можно показать, используя традиционные подходы к определения центра масс и центра колебаний. Для расчетной схемы на рис. 4 положение центра масс по оси  $x$  определится, как

$$x_0 = l_0 \frac{m_2 \cdot (l+r)}{m_1 + m_2}, \quad (17)$$

где точка отсчета связана с положением массы  $m_1$ , находящейся на конце рычага. Соответственно движение центра масс колебаний можно найти, зная  $y_1$  и  $y_2$

$$y_0 = \frac{y_2 x_0 + y_1 (l+r-l_0)}{l+r}, \quad (18)$$

Приняв  $a = l_0 / (l+r)$ ,  $b = (1-a)$ , запишем

$$y_0 = y_2 a + y_1 b. \quad (19)$$

Кроме того, введем некоторые соотношения

$$y_1 = y_0 - l_0 \varphi, \quad y_2 = y_0 + (l+r-l_0) \varphi, \quad \varphi = \frac{y_1 - y_2}{l+r} = c(y_1 - y_2), \quad (20)$$

где  $c = \frac{1}{l+r}$ .

Выражения для кинетической и потенциальной энергии в этом случае принимают вид:

$$T = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} m_1 l_0^2 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_2 r^2 \dot{\varphi}^2, \quad (21)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_2')^2, \quad (22)$$

где 
$$y_2' = y_0 + (l - l_0)\varphi. \quad (23)$$

Преобразуем (2.21), (2.22) к виду

$$T = \frac{1}{2} (M) (\dot{y}_2^2 a^2 + 2\dot{y}_2 \dot{y}_1 ab + \dot{y}_1^2 b^2) + \frac{1}{2} m_1 l_0^2 c^2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \frac{1}{2} (l + r - l_0)^2 c^2 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2); \quad (24)$$

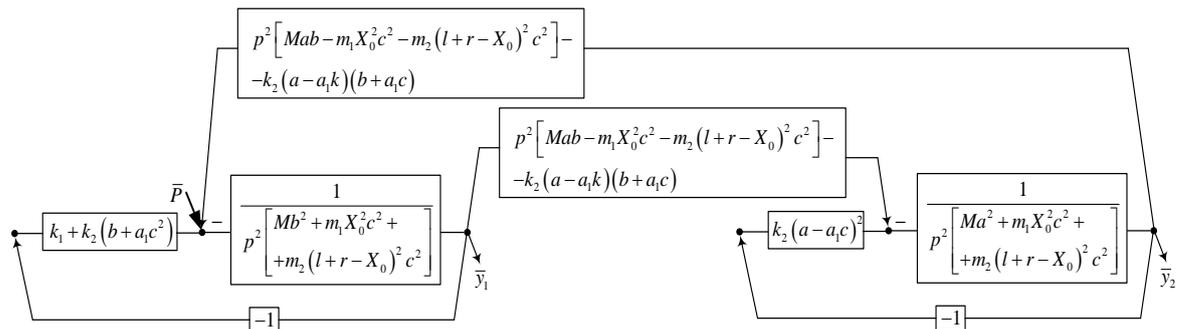
$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (y_1^2 a^2 + 2y_1 y_2 ab + y_2^2 b^2). \quad (25)$$

Вводя  $a = l - l_0$ ,  $M = m_1 + m_2$  и производя обычные преобразования, найдем дифференциальные уравнения движения

$$\ddot{y}_1 [Mb^2 + m_1 l_0 c^2 + m_2 (l + r - l_0)^2 c^2] + k_1 y_1 + k_2 y_2 (b + a_1 c)^2 + \ddot{y}_2 [Mab - m_1 l_0 c^2 - m_2 (l + r - l_0)^2 c^2] - y_2 k_2 (a - a_1 c)(b + a_1 c) = P, \quad (26)$$

$$\ddot{y}_2 [Ma^2 + m_1 l_0 c^2 + m_2 (l + r - l_0)^2 c^2] + k_2 y_2 (a - a_1 c)^2 + \ddot{y}_1 [Mab - m_1 l_0 c^2 - m_2 (l + r - l_0)^2 c^2] - y_1 k_1 (b + a_1 c)(a - a_1 c) = 0, \quad (27)$$

Структурная схема системы, соответствующая расчетной схеме на рис. 2.4, приведена на рис. 7.



**Рис. 7.** Структурная схема системы на рис. 2.6 с рычагом имеющим плечи  $l$  и  $r$ , где приняты обозначения:  $l_0 = \frac{m_2(l+r)}{m_1+m_2}$ ;  $M = m_1 + m_2$ ;  $c = \frac{1}{l+r}$ ;  $a = \frac{X_0}{l+r}$ ;  $l = 1 - a$ ;  $a_1 = l - l_0$ .

Из рассмотрения структурной схемы системы на рис. 7 можно сделать вывод, что в системе появляются упруго-инерционные связи, которые могут на определенных частотах «зануляться»; что касается выражений для кинетической (24) и потенциальной (25) энергий, то они имеют полную квадратичную формулу.

**Заключение.** Таким образом, детализированное рассмотрение структуры механических колебательных систем связано с использованием представлений о свойствах, проявляемых в рычажных взаимодействиях. При рассмотрении колебаний в механических системах вполне возможно введение понятия «виртуальных рычагов или виртуальных рычажных механизмов», однако само понятие виртуальности предполагает возможность проявления в динамических взаимодействиях элементов механических систем «рычажных связей». Такие связи могут иметь физическую форму, а могут и не иметь [5]. В том случае, когда в механической колебательной системе используются рычажные механизмы или рычаги первого или второго рода, динамическое состояние механической колебательной

системы описываются совершенно иной системой дифференциальных уравнений, что требует иных физических представлений и связано с изучением других особенностей динамического состояния систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. СПб.: «Лань». 2009. 432 с.
2. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.Б. Прикладные задачи структурной теории виброзащитных систем. СПб: Политехника. 2013. 364 с.
3. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.Б., Нгуен Д.Х., Цыган В.В. О связях между координатами движения в механических колебательных системах с рычажными устройствами // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 2 (26). С. 7-13.
4. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Ситов И.С. Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи. СПб.: Политехника. 2013. 319 с.
5. Генкин М.Д., Рябой В.М. Упруго-инерционные виброизолирующие системы. Предельные возможности, оптимальные структуры. М.: Наука. 1988. 191с.
6. Дружинский И.А. Механические цепи. М.: Машиностроение. 1977. 238 с.
7. Елисеев С.В., Московских А.О., Каимов Е.В. Структурные интерпретации механических колебательных систем в теории электрических цепей и теории автоматического управления. ИрГУПС. Иркутск. 2014. 82 с. Деп. в ВИНТИ 13.01.2014 №8 – В 2014.
8. Елисеев С. В., Хоменко А. П. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования. Новосибирск: Наука. 2014. 357 с.
9. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Динамические свойства колебательных систем. Связность движений // Материалы XIX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Т.1. 2014. С. 89-99.
10. Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Сочленения звеньев в динамике механических колебательных систем. Иркутск: ИрГУПС. 2012. 156 с.
11. Елисеев С.В., Кашуба В.Б., Ермошенко Ю.В. Рычажные связи в задачах динамики транспортной подвески // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 9. С. 24-31.
12. Елисеев С.В., Кинаш Н.Ж., Каимов Е.В. Рычажные связи механических колебательных систем // Вестник ВЭлНИИ. 2015. № 1 (69). С. 112-126.
13. Елисеев С.В., Кинаш Н.Ж., Нгуен Д.Х. Особенности обратных связей при колебаниях систем с рычажными связями // Известия Транссиба. 2015. № 3 (23). С. 14-24.
14. Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Каимов Е.В. К вопросу о теории рычажных связей в динамике механических колебательных систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12 (107). С. 30-40.
15. Елисеев С.В., Лончих П.А., Кашуба В.Б., Паршута Е.А., Каимов Е.В., Нгуен Х.Д. Новые подходы в динамике механических упруго-инерционных систем с рычажными связями // Материалы Международной научно-практической конференции «Наука и образование в жизни современного общества». Т. I. 2015. С. 75-85.
16. Елисеев С.В., Московских А.О., Большаков Р.С., Савченко А.А. Возможности интеграции методов теории цепей и теории автоматического управления в задачах

- динамики машин // technomag.edu.ru: Наука и образование: электронное научно-техническое издание. №6. 2012. URL. [http:// technomag.edu.ru/doc/378699. html](http://technomag.edu.ru/doc/378699.html) (дата обращения: 10.06.2012).
17. Елисеев С.В., Резник Ю.И., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука. 2011. 384 с.
18. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. Иркутск: ИГУ. 2008. 523 с.
19. Ивашов Е.Н., Васин В.А., Степанчиков С.В. Механические системы электронного машиностроения на основе многокоординатных исполнительных устройств // Вестник машиностроения. 2009. № 7. С. 3-10.
20. Каимов Е.В., Кузнецов Н.К., Елисеев С.В. Некоторые приложения теории рычажных связей. Ирк . гос . ун – т путей сообщ. Иркутск. 2015. 43 с. Библиогр. 23 назв. Рус. Деп . в ВИНТИ 05.10.2015 № 160 – В 2015
21. Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем. Иркутск: ИрГУПС. 2012. 288 с.
- 

**UDK 62.752, 621:534.833, 888.6**

**VIRTUAL LEVER TIES: PARTICULARITIES OF  
MECHANICAL OSCILLATION SYSTEMS**

**Sergey V. Eliseev**

Dr., professor, director – chief Scientific Officer of Science-educational center of modern technologies, system analysis and modeling, Irkutsk State Transport University, 664074, Irkutsk, Chernishevskogo str.. 15, e-mail: eliseev\_s@inbox.ru

**Vladimir B. Kashuba**

Ph.D., docent, first prorektor, Bratsk State University, 665709, Bratsk, Makarenko str., 40, e-mail: nauka@brstu.ru

**Inna V. Kovrigina**

Ph.D., docent of department of «Rolling stock of railways», Zabaikal'skii Institut railway transport, branch Irkutsk State Transport University, 672040, Chita, Magistralnaya str., 11, e-mail: fominainna@rambler.ru

**Nikita Z. Kinash**

Head of department of examination and monitoring of the introduction of technologies and innovations in the projects of the Moscow Engineering Center, Moscow railway– RZD branch, 107996, Moscow, Krasnoprudnaya str., 20, e-mail: kinashnikita@yandex.ru

**Abstract.** Questions of rationale of exhibition of lever ties in mechanical oscillation systems Is shown that lever ties are reflected in structure of equations for kinetical and potential energies. Analytical ratios and structures for identification of features and lever ties forms are created in linear mechanical systems with two freedom degrees. Definition about lever tie is introduced. This tie is implemented through ratio of parameters of system movement, but doesn't take of explicit forms of lever

mechanisms. Method of creature of mathematical models with accounting lever ties and structure of initial system is offered.

**Key words:** lever ties, virtual levers, structural schemes, transfer ratios, structures.

### References

1. Atabekov G.I. Osnovy teorii cepej [Fundamentals of chain theory]. SPb.: «Lan'». 2009. 432 p.
2. Belokobil'skiy S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B. Prikladnye zadachi strukturnoj teorii vibrozashchitnyh sistem [Applied tasks of the structural theory of vibroprotective systems]. SPb.; Politehnika. 2013. 364 p.
3. Belokobyl'sliy S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B., Nguen Kh.D., Tsigan V.V. O svyazyah mezhdru koordinatami dvizheniya v mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistemah s rychazhnymi ustrojstvami [About ties between coordinates of movement in mechanical oscillation systems with lever devices] // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 2 (26). Pp. 7-13.
4. Belokobyl'sliy S.V., Eliseev S.V., Sitov I.S. Dinamika mekhanicheskikh sistem. Rychazhnye i inercionno-uprugie svyazi [Dynamics of mechanical systems. Lever and inertial and elastic ties]. SPb.; Politehnika. 2013. 319 p.
5. Genkin M.D., Ryaboy V.M. Uprugo-inercionnye vibroizoliruyushchie sistemy. Predel'nye vozmozhnosti, optimal'nye struktury [Elastic-inertial vibroisolation systems. Limit possibilities, optimal structures]. M.: Science. 1988. 191 p.
6. Druzhiskiy I.A. Mekhanicheskie cepi [Mechanical chains]. M.: Mechanical engineering. 1977. 238 p.
7. Eliseev S.V., Moskovskikh A.O., Kaimov E.V. Strukturnye interpretacii mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistem v teorii ehlektricheskikh cepej i teorii avtomaticheskogo upravleniya [Structural interpretations of mechanical oscillation systems in electrical chains theory and automation control theory]. ISTU. Irkutsk. 2014. 82 p. Dep. in VINITI 13.01.2014 №8. V 2014.
8. Eliseev S.V., Khomenko A.P. Dinamicheskoe gashenie kolebanij: koncepciya obratnoj svyazi i strukturnye metody matematicheskogo modelirovaniya [Dynamical absorbtion of oscillations: concept of feedback tie and structural methods of mathematical modeling]. Novosibirsk. Nauka. 2014. 357 p.
9. Eliseev S.V., Artyunin A.I. Dinamicheskie svoystva kolebatel'nyh sistem. Svyaznost' dvizhenij [Dynamical properties of oscillation systems. Cohesion of movements ] // Materials XIX Baikal Allrussian conference «Information and mathematical in science and control». V.1. 2014. Pp. 89-99.
10. Eliseev S.V., Ermoshenko Yu.V. Sochleneniya zven'ev v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistem [Couplings of links in dynamics of mechanical oscillation systems]. Irkutsk: ISTU. 2012. 156 p.
11. Eliseev S.V., Kashuba V.B., Ermoshenko Yu.V. Rychazhnye svyazi v zadachah dinamiki transportnoj podveski [Lever ties in tasks of dynamics of transport suspension] // Systems. Methods. Technologies. 2011. № 9. Pp. 24-31.
12. Eliseev S.V., Kinash N.Zh., Kaimov E.V. Rychazhnye svyazi mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistem [Lever ties of mechanical oscillation systems] // Vestnik VEINII. 2015. № 1 (69). Pp. 112-126.

13. Eliseev S.V., Kinash N.Zh., Nguen Kh.D. Osobennosti obratnyh svyazey pri kolebaniyah sistem s rychazhnymi svyazyami [Features of feedback ties at oscillations of systems with lever ties] // *Izvestiya Transsiba*. 2015. № 3 (23). Pp. 14-24.
14. Eliseev S.V., Kuznetsov H.K., Kaimov E.V. K voprosu o teorii rychazhnyh svyazey v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistem [To the question about theory of lever ties in dynamics of mechanical oscillation systems] // *Vestnik of Irkutsk State Technical University*. 2015. № 12 (107). Pp. 30-40.
15. Eliseev S.V., Lontsikh P.A., Kashuba V.B., Parshuta E.A., Kaimov E.V., Nguen Kh.D. Novye podhody v dinamike mekhanicheskikh uprugo-inercionnyh sistem s rychazhnymi svyazyami [New approaches in dynamics of mechanical elastic-inertial systems with lever ties] // *Materials of International science-practical conference «Science and education on life of modern society»*. V. I. 2015. Pp. 75-85.
16. Eliseev S.V., Moskovskikh A.O., Bolshakov R.S., Savchenko A.A. Vozmozhnosti integracii metodov teorii cepej i teorii avtomaticheskogo upravleniya v zadachah dinamiki mashin [Possibilities of integration of methods of chains theory and automation control theory in tasks of machines dynamics] // *technomag.edu.ru: Science and education: internet science-technical edition*. №6. 2012. Available at: [http:// technomag.edu.ru/doc/378699](http://technomag.edu.ru/doc/378699). Html, accessed: 10.06.2012.
17. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. Mekhatronnye podhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistem [Mechatronics approaches in dynamics of mechanical oscillatory systems]. Novosibirsk. Nauka. 2011. 384 p.
18. Eliseev S.V., Reznik Yu. N., Khomenko A.P., Zasyadko A.A. Dinamicheskij sintez v obobshchennyh zadachah vibrozashchity i vibroizolyacii tekhnicheskikh ob"ektov [Dynamic synthesis in the generalized problems of vibroprotection and a vibration insulation of technical objects]. Irkutsk: publ. ISU. 2008. 523 p.
19. Ivashov E.N., Vasin V.A., Stepanchikov S.V. Mekhanicheskie sistemy ehlektronnogo mashinostroeniya na osnove mnogokoordinatnyh ispolnitel'nyh ustrojstv [Mechanical systems of electroronic mechanical engineering on base of multi-coordinates devices] // *Vestnik mechanical engineering*. 2009. № 7. Pp. 3-10.
20. Kaimov E.V., Kuznetsov N.K., Eliseev S.V. Nekotorye prilozheniya teorii rychazhnyh svyazey [Some applications of lever ties theory]; ISTU. Irkutsk/ 2015. 43 p. Bibl. : 23 nam. Rus. – Dep. in VINITI 05.10.2015 № 160. V 2015
21. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Ermoshenko Yu.V. Sistemnyj analiz i matematicheskoe modelirovanie v mekhatronike vibrozashchitnyh sistem [System analysis and mathematical modeling in mechatronics of vibroprotection]. Irkutsk: ISTU. 2012. 288 p.

## О РАСШИРЕНИИ НАБОРА ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Кашуба Владимир Богданович**

К.т.н., доцент, первый проректор, Братский государственный университет  
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, e-mail: nauka@brstu.ru

**Большаков Роман Сергеевич**

К.т.н., старший научный сотрудник Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского 15, e-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

**Кинаш Никита Жданович**

Начальник отдела экспертизы и мониторинга внедрения технологий и инноваций в проекты Московского инженерного центра, Московская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»,  
107996, г. Москва, ул. Краснопрудная, д. 20, e-mail: kinashnikita@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается механическая колебательная система с двумя степенями свободы. Исследование проводится на основе сопоставления расчетной схемы исходной системы, эквивалентной в динамическом отношении структурной схеме автоматического управления. Предлагается метод определения динамических реакций на базе представлений об отрицательной обратной связи относительно объекта вибрационной защиты в структурной схеме автоматического управления. Показано, что динамическая реакция может быть использована в качестве дополнительного параметра оценки динамического состояния механической колебательной системы.

**Ключевые слова:** параметры динамического состояния, механическая колебательная система, реакции связей, динамическая жесткость.

**Введение.** Сложные технические объекты работают в условиях интенсивных вибрационных воздействий, что провоцирует возникновение различных форм динамических взаимодействий между составляющими их элементами. Для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации машин параметры таких процессов должны учитываться при расчетах и контролироваться в ходе эксплуатации. Подходы в этом направлении достаточно развиты в [1–3]. Вопросы нахождения динамических реакций менее разработаны, хотя знание динамических составляющих реакций дает возможность оценивать величины полных реакций и не допускать их нулевых или отрицательных значений, что может приводить к нарушениям контактов и появлению соударений при неударяющих связях.

В предлагаемом докладе рассматривается метод определения динамических реакций в механических колебательных системах, основанный на представлениях об обратных связях в таких системах, а также предлагается расширить набор параметров для оценки динамического состояния этих систем за счет динамических реакций.

**1. Общие положения. Постановка задачи исследования.** Рассматривается расчетная схема в виде механической колебательной структуры с двумя степенями свободы (рис. 1а). Система совершает малые вертикальные колебания в координатах  $y_1$ ,  $y_2$  относительно

неподвижного базиса. Объект вибрационной защиты  $m_2$  входит в механическую колебательную систему, состоящую из трех упругих элементов с жесткостями  $k_1, k_2, k_3$  и промежуточной массой  $m_1$ . Возмущение представлено периодической силой  $Q_2$  (гармоническое воздействие), приложенной к объекту защиты  $m_2$  (рис. 1а). В рассматриваемой задаче силы сопротивления не учитываются, их влияние может быть учтено отдельно. Математическая модель системы представляет собой систему из двух дифференциальных уравнений:

$$m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2)y_1 - k_2 y_2 = 0, \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + (k_2 + k_3)y_2 - k_2 y_1 = Q_2(t). \quad (2)$$

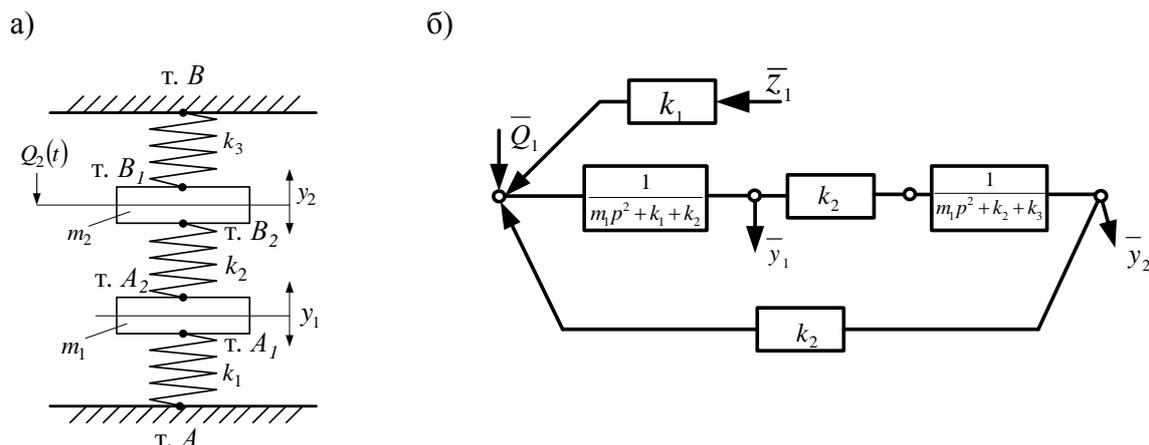


Рис. 1. Расчетная (а) и структурная (б) схемы виброзащитной системы

Использование преобразований Лапласа позволяет построить структурную схему эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления, как показано на рис. 1, б, где  $p = j\omega$  - является комплексной переменной, а

$$A_0 = (m_1 p^2 + k_1 + k_2) \cdot (m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2 \quad (3)$$

представляет собой характеристическое частотное уравнение.

Отметим, что на рис. 1 все точки  $A, A_1, A_2, B, B_1, B_2$  выделены для последующего определения в них динамических реакций. На основании структурной схемы (рис. 1, б) могут быть найдены передаточные функции системы при входном воздействии  $\bar{Q}_2$  и выходных сигналах в виде координат  $y_1$  и  $y_2$ :

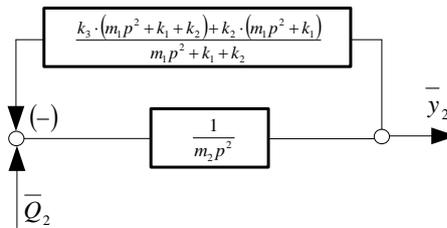
$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_2} = \frac{k_2}{A_0}, \quad (4)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_2} = \frac{m_1 p^2 + k_1 + k_2}{A_0}, \quad (5)$$

где  $Q_2 = Q_0 \cdot \sin \omega t$ ,  $A_0$  – определяется из (3).

**2. Особенности построения математических моделей.** Структурная схема системы (рис. 1б) может быть преобразована (рис. 2) и разрешена относительно базового звена, соответствующего объекту защиты ( $m_2$ ), имеющего, в свою очередь, передаточную функцию интегрирующего звена второго рода:

$$W_{m_2}(p) = \frac{1}{m_2 p^2}. \quad (6)$$



**Рис. 2 .** Преобразованная структурная схема системы на рис.1б  
( выделение объекта защиты – отрицательная обратная связь)

На рис. 2 показано, что преобразование начальной структурной схемы (рис. 1б) позволяет выделить прямую цепь, в состав которой входит передаточная функция (6) объекта защиты. Передаточная функция цепи обратной связи может изменять знак (+) на знак (-) при соответствующем изменении структуры обратной связи [4, 5].

Для дальнейших преобразований система уравнений (1) и (2) может быть с учетом преобразований Лапласа приведена к виду:

$$m_1 p^2 \bar{y}_1 + (k_1 + k_2) \bar{y}_1 - k_2 \bar{y}_2 = 0, \quad (7)$$

$$m_2 p^2 \bar{y}_2 + (k_2 + k_3) \bar{y}_2 - k_2 \bar{y}_1 = \bar{Q}_2. \quad (8)$$

Полагая, что из (7) –

$$\bar{y}_1 = \bar{y}_2 \cdot \frac{k_2}{m_1 p^2 + k_1 + k_2}, \quad (9)$$

получим (8) в виде

$$m_2 p^2 \bar{y}_2 + (k_2 + k_3) \bar{y}_2 - k_2 \cdot \bar{y}_2 \cdot \frac{k_2}{m_1 p^2 + k_1 + k_2} = \bar{Q}_2. \quad (10)$$

или

$$m_2 p^2 \bar{y}_2 + \frac{(k_2 + k_3) \cdot (m_1 p^2 + k_1) + k_2 \cdot k_3}{m_1 p^2 + k_1 + k_2} \cdot \bar{y}_2 = \bar{Q}_2. \quad (11)$$

Из (11) можно получить условие кинестатики, для элемента массой  $m_2$

$$\bar{F}_{ин} + \bar{R}_{m_2} = \bar{Q}_2, \quad (12)$$

где  $\bar{F}_{ин} = m_2 p^2 \bar{y}_2$  – изображение по Лапласу силы инерции элемента массой  $m_2$ ;

$$\bar{R}_{m_2} = \frac{(k_2 + k_3) \cdot (m_1 p^2 + k_1) + k_2 \cdot k_3}{m_1 p^2 + k_1 + k_2} \cdot \bar{y}_2 - \quad (13)$$

изображение по Лапласу реакций связи со стороны системы, состоящей из элементов  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $m_1$ ;  $\bar{Q}_2$  - изображение по Лапласу внешней силы  $Q_2$ .

**3. Построение математической модели для определения динамических реакций по координате  $\bar{y}_1$ .** Структурная схема на рис. 1а может быть преобразована к виду, как показано на рис. 3. В этом случае, так же как и ранее, реализуется переход к схеме, в которой будет выделено массоинерционное звено  $m_1$  с передаточной функцией:

$$W_{m_1}(p) = \frac{1}{m_1 p^2}. \quad (14)$$

Схема распределения динамических сил отличается от структурной схемы на рис. 2.

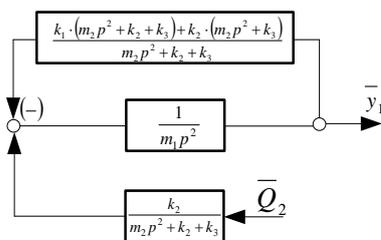


Рис. 3. Структурная схема, преобразованная относительно звена  $m_1$

Для определения реакции, отнесенной к элементу  $m_1$ , используем (7), откуда следует, что:

$$\bar{y}_2 = \frac{\bar{Q}_2 + k_2 \cdot \bar{y}_1}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} \quad (15)$$

После подстановки в (7) получим:

$$m_1 p^2 \cdot \bar{y}_1 + (k_1 + k_2) \cdot \bar{y}_1 - k_2 \cdot \frac{\bar{Q}_2 + k_2 \cdot \bar{y}_1}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} = 0$$

или

$$m_1 p^2 \cdot \bar{y}_1 + \frac{(k_1 + k_2) \cdot (m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2^2}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} \cdot \bar{y}_1 = \frac{k_2 \cdot \bar{Q}_2}{m_2 p^2 + k_2 + k_3}, \quad (16)$$

откуда можно найти, что динамическая реакция на  $m_1$  определяется выражением:

$$\bar{R}_{m_1} = \frac{k_1 \cdot (m_2 p^2 + k_2 + k_3) + k_2 \cdot (m_2 p^2 + k_3)}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} \cdot \bar{y}_1. \quad (17)$$

При этом сила инерции на  $m_1$  имеет вид:

$$F'_{ин} = m_1 p^2 \cdot \bar{y}_1, \quad (18)$$

а внешняя сила принимает форму выражения:

$$\bar{Q}_{1экв} = \bar{Q}_2 \cdot \frac{k_2}{m_2 p^2 + k_2 + k_3}. \quad (19)$$

То есть при определении реакции на массоинерционном элементе  $m_1$  внешняя сила  $\bar{Q}_2$  передает свои динамические воздействия, но этот эффект должен рассматриваться с учетом того обстоятельства, что на элемент с массой  $m_1$  действует не  $\bar{Q}_2$ , а сила  $\bar{Q}_{1экв}$ , определенная из (19). Что касается динамической реакции на  $m_1$ , то она связана с параметрами обратной отрицательной связи в соответствии со структурной схемой на рис. 3.

Приведенная жесткость обобщенной пружины для элемента с массой  $m_1$  имеет вид:

$$k_{пр_{m_1}}(p) = \frac{k_1 \cdot (m_2 p^2 + k_2 + k_3) - k_2 \cdot (m_2 p^2 + k_3)}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} \quad (20)$$

или

$$k_{пр_{m_1}} = k_1 + k_{23}, \quad (21)$$

где

$$k_{23} = \frac{k_2 \cdot (m_2 p^2 + k_3)}{m_2 p^2 + k_2 + k_3}. \quad (22)$$

При  $p = 0$  (22) может быть упрощено:

$$k_{23} = \frac{k_2 \cdot k_3}{k_2 + k_3}, \quad (23)$$

что соответствует параметрам последовательно соединенных упругих элементов с жесткостями  $k_2$  и  $k_3$ . Характерными режимами для элемента  $m_1$  являются: режим динамического гашения на частоте

$$\omega^2 = \frac{k_2 + k_3}{m_2}, \quad (24)$$

а также режим, при котором механическая система (или компакт) из  $m_2, k_2, k_3$  не влияют на движение по  $k_1$  на частоте

$$\omega^2 = \frac{k_3}{m_2}. \quad (25)$$

#### 4. Особенности динамической реакции в механической колебательной системе.

Используя полученные выражения для жесткостей элементов, в том числе приведенных жесткостей, а также значения для перемещений  $m_1$  и  $m_2$ , найдем, что:

$$\bar{R}_A = k_1 \cdot \bar{y}_1 = \frac{k_1 \cdot k_2}{A_0} \cdot \bar{Q}_2; \quad (26) \quad \bar{R}_{A_1} = \bar{R}_A = \frac{k_1 \cdot k_2}{A_0} \cdot \bar{Q}_2; \quad (27)$$

$$\bar{R}_{m_1} = R_{A_1} + R_{A_2} = \left( k_1 + \frac{k_2 \cdot (m_2 p^2 + k_3)}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} \right) \cdot \frac{k_2}{A_0} \cdot \bar{Q}_2; \quad (28)$$

$$R_{A_2} = \frac{k_2 \cdot (m_2 p^2 + k_3)}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} \cdot \frac{k_2}{A_0} \cdot \bar{Q}_2; \quad (29)$$

$$\bar{R}_B = k_3 \cdot \bar{y}_2 = \frac{k_3 \cdot (m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0} \cdot \bar{Q}_2; \quad (30)$$

$$\bar{R}_{B_1} = \bar{R}_B = \frac{k_3 \cdot (m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0} \cdot \bar{Q}_2; \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{m_2} &= \left\{ \frac{k_3 \cdot (m_1 p^2 + k_1 + k_2) + k_2 \cdot (m_1 p^2 + k_1)}{(m_1 p^2 + k_1 + k_2)} \right\} \cdot \frac{(m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0} \cdot \bar{Q}_2 = \\ &= \frac{k_3 \cdot (m_1 p^2 + k_1 + k_2) + k_2 \cdot (m_1 p^2 + k_1)}{A_0} \cdot \bar{Q}_2; \end{aligned} \quad (32)$$

$$R_{B_2} = \frac{k_2 \cdot (m_1 p^2 + k_1)}{A_0} \cdot \bar{Q}_2. \quad (33)$$

Выражения (26)–(33) могут быть переведены в передаточные функции системы с входным воздействием в виде внешней гармонической силой  $Q_2$  и выходным сигналом, представляющим собой соответствующую динамическую реакцию. Так, например, передаточная функция пары  $\bar{Q}_2$  и  $\bar{R}_A$  имеет вид:

$$W_{R_A}^{(p)} = \frac{\bar{R}_A}{\bar{Q}_2} = \frac{k_1 \cdot k_2}{A_0}; \quad (34)$$

в свою очередь, по точке  $B$ :

$$W_{R_B}^{(p)} = \frac{\bar{R}_B}{\bar{Q}_2} = \frac{k_3 \cdot (m_1 p^2 + k_1 + k_2)}{A_0}. \quad (35)$$

Сравнение (34) и (35) показывает, что реакции на опорных поверхностях системы будут разными, а амплитудно-частотные характеристики будут с одинаковыми экстремумами при нулях характеристического уравнения  $A_0$ , но реакция в точке  $B$  будет иметь минимум на частоте  $\omega^2 = \frac{k_1 + k_2}{m_1}$ ; при этом в точке  $A$  реакция не будет иметь таких значений. Для элемента  $m_2$  можно записать, что передаточная функция  $\bar{R}_{m_2}$  при входном воздействии  $\bar{Q}_2$  примет вид:

$$\begin{aligned} W(p)_{R_{m_2}} &= \frac{\bar{R}_{m_2}}{\bar{Q}_2} = \frac{k_3 \cdot (m_1 p^2 + k_1 + k_2) + k_2 \cdot (m_1 p^2 + k_1)}{A_0} = \\ &= \frac{m_1 p^2 \cdot (k_2 + k_3) + k_2 \cdot k_1 + k_1 \cdot k_3 + k_3 \cdot k_2}{A_0}. \end{aligned} \quad (36)$$

Из (36) следует, что на частоте

$$\omega^2 = \frac{k_1 \cdot k_2 + k_1 \cdot k_3 + k_2 \cdot k_3}{(k_2 + k_3) \cdot m_1} \quad (37)$$

динамическая реакция принимает нулевое значение. Однако, это не означает, что на элемент  $m_2$  не будут действовать силы, поскольку остается статическая компонента общей реакции. При этом колебательные движения системы совершаются относительно положения статического равновесия. Передаточная функция динамической реакции по  $m_1$  при входном сигнале  $\bar{Q}_2$  принимает вид:

$$W_{R_{m_1}}(p) = \frac{\bar{R}_{m_1}}{\bar{Q}_2} = \frac{[k_1 \cdot (m_2 p^2 + k_2 + k_3) + k_2 \cdot (m_2 p^2 + k_3)] \cdot k_2}{m_2 p^2 + k_2 + k_3} \cdot \frac{1}{A_0}. \quad (38)$$

Особенность динамических взаимодействий на элементе  $m_1$  такова, что на частоте

$$\omega^2 = \frac{k_2 \cdot (k_2 + k_3) + k_2 \cdot k_3}{m_2 \cdot (k_1 + k_2)} \quad (39)$$

возникает режим «обнуления» динамической реакции, а на частоте

$$\omega^2 = \frac{k_2 + k_3}{m_2} \quad (40)$$

динамическая реакция принимает бесконечно большое значение. В данном случае становится возможным совпадение с режимом динамического гашения колебаний. В физическом смысле это означает, что на этой частоте динамическая реакция соответствует бесконечно большой жесткости обобщенной пружины; при этом элемент массой  $m_2$  становится неподвижным. Кроме упомянутого режима, в соответствии с нулями характеристического уравнения  $A_0$ , будут наблюдаться также два резонанса. Таким образом, если иметь в виду амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), соответствующую передаточной функции (38), то АЧХ по динамическим реакциям будут отличаться от известных, что вполне объяснимо с физических позиций, поскольку динамическая реакция сама по себе является другим параметром, чем координаты  $y_1$  и  $y_2$ .

**Заключение.** Предложен метод определения динамических реакций между элементами систем вибрационной защиты. В основе метода лежит приведение структурных математических моделей механических колебательных систем к определенному виду, когда относительно объекта защиты как звена с передаточной функцией интегрирующего звена

второго порядка выделяется обратная отрицательная связь, интерпретируемая как динамическая реакция. Такие структурные схемы могут быть развернуты не только относительно объекта защиты, но и для других массоинерционных элементов, что предполагает возможности расширения метода на системы со многими степенями свободы. Полученные теоретические результаты показывают, что использование динамических реакций как параметра оценки динамических свойств виброзащитных систем позволяет создать не только методическую основу для расчета элементов колебательной системы, но и расширить представления о возможностях проявления ранее не рассматривавшихся физических эффектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев С.В., Резник Ю.И., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. Иркутск: ИГУ. 2008. 523 с.
2. Елисеев С.В., Резник Ю.И., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука. 2011. 384 с.
3. Елисеев С.В., Хоменко А.П. Динамическое гашение колебаний: концепция обратной связи и структурные методы математического моделирования. Новосибирск: Наука. 2014. 357 с.
4. Елисеев, С.В. Концепция обратной связи в динамике механических систем и динамическое гашение колебаний [Электронный ресурс] / С.В. Елисеев, А.Н. Трофимов, Р.С. Большаков, А.А. Савченко // [technomag.edu.ru](http://technomag.edu.ru): Наука и образование: электронное научно-техническое издание. №5. 2012. URL. <http://technomag.edu.ru/doc/378353.html> (дата обращения: 10.05.2012).
5. Елисеев, С.В. Особенности построения компактов упругих элементов в механических колебательных системах. Взаимодействия с элементами систем и формы соединения [Текст] / С.В. Елисеев, С.В. Ковыршин, Р.С. Большаков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Выпуск № 4(36). 2012. С. 61- 70.

---

УДК 62.752, 621:534;833; 888.6, 629.4.015;02

#### ABOUT EXTENSION OF ESTIMATION DYNAMICAL CIRCUMSTANCE PARAMETERS SET OF MECHANICAL OSCILLATION SYSTEMS

**Vladimir B. Kashuba**

Ph.D., docent, first prorektor, Bratsk State University,  
665709, Bratsk, Makarenko str., 40, e-mail: nauka@brstu.ru

**Roman S. Bolshakov**

Ph.D., senior researcher of Science-educational center of modern technologies, system analysis and modeling, Irkutsk State Transport University, 664074, Irkutsk, Chernishevskogo str.. 15, e-mail: bolshakov\_rs@mail.ru

**Nikita Z. Kinash**

Head of department of examination and monitoring of the introduction of technologies and innovations in the projects of the Moscow Engineering Center, Moscow railway– RZD branch, 107996, Moscow, Krasnoprudnaya str., 20, e-mail: kinashnikita@yandex.ru

**Abstract.** Mechanical oscillation system with two freedom degrees is considered. Research is conducted on base comparison of design scheme of initial system of equivalent in dynamical ratio structural scheme of automation control. Method of identification of dynamical responses on base of ideas about negative feedback tie relatively vibration protection object in structural scheme of automation control is offered. Is shown that dynamical response can be used as additional parameter of estimation of dynamical condition of mechanical oscillation system.

**Keywords:** parameters of dynamical condition, mechanical oscillation system, responses of ties, dynamical stiffness.

### References

1. Eliseev S.V., Reznik Yu. N., Khomenko A.P., Zasyadko A.A. Dinamicheskij sintez v obobshchennyh zadachah vibrozashchity i vibroizolyacii tekhnicheskikh ob"ektov [Dynamic synthesis in the generalized problems of vibroprotection and a vibration insulation of technical objects]. Irkutsk: publ. ISU. 2008. 523 p. (in Russian)
2. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. Mekhatronnye podhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistem [Mechatronics approaches in dynamics of mechanical oscillatory systems. Novosibirsk]. Nauka. 2011. 384 p. (in Russian)
3. Eliseev S.V., Khomenko A.P. Dinamicheskoe gashenie kolebanij: koncepciya obratnoj svyazi i strukturnye metody matematicheskogo modelirovaniya [Dynamical absorbtion of oscillations: concept of feedback tie and structural methods of mathematical modeling]. Novosibirsk. Nauka. 2014. 357 p. (in Russian)
4. Eliseev S.V., Trofimov A.N., Bolshakov R.S., Savchenko A.A. Koncepciya obratnoj svyazi v dinamike mekhanicheskikh sistem i dinamicheskoe gashenie kolebanij [Concept of feedback tie in dynamics of mechanical systems and dynamical absorbtion of oscillations] // technomag.edu.ru: Science and education: internet science-technical edition. №5. 2012. URL. [http:// technomag.edu.ru/doc/378353. html](http://technomag.edu.ru/doc/378353.html) (accessed: 10.06.2015). (in Russian)
5. Eliseev S.V., Kovyrshin S.V., Bolshakov R.S. Osobennosti postroeniya kompaktoy uprugih ehlementov v mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistemah. Vzaimodejstviya s ehlementami sistem i formy soedineniya [Features of creature of compacts of elastical elements in mechanical oscillation systems. Interactions with system elements and connection forms]// Modern technologies. System analysis. Modeling. Issue № 4(36). 2012. Pp. 61- 70. (in Russian)

**УДК 534-16; 531.8;62.752; 621.01; 621.8.02**

**ДИНАМИЧЕСКОЕ ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В  
СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВИБРАЦИЙ**

**Елисеев Андрей Владимирович**

К.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: eavsh@ya.ru

**Каимов Евгений Витальевич**

К.т.н., младший научный сотрудник, e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

**Нгуен Дык Хуинь**

Аспирант, e-mail: huynhnd1987@gmail.com

**Вьонг Куанг Чык**

Аспирант, e-mail: trucvq1990@gmail.com

Научно-образовательный центр современных технологий, системного анализа и моделирования, Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского 15

**Аннотация.** Разработана математическая модель вибростенда с инерционным возбуждением и предложены аналитические соотношения. Для оценки динамических свойств вводится передаточная функция межпарциальных связей. Настройка вибрационного поля осуществляется путем выбора массоинерционных параметров, связанных с моментом инерции рабочего стола, его массой и расположением центра тяжести. Для контроля параметров динамического состояния механической колебательной системы используются передаточные функции и частотные характеристики. Концепция управления параметрами вибрационного поля основана на использовании эффектов динамического гашения колебаний. Получены условия для снижения нагрузок на возбудитель и обеспечения необходимого уровня управляемости в выборе параметров вибрационного поля рабочей зоны вибростола. Предлагается методика расчета. Приведены результаты численного эксперимента.

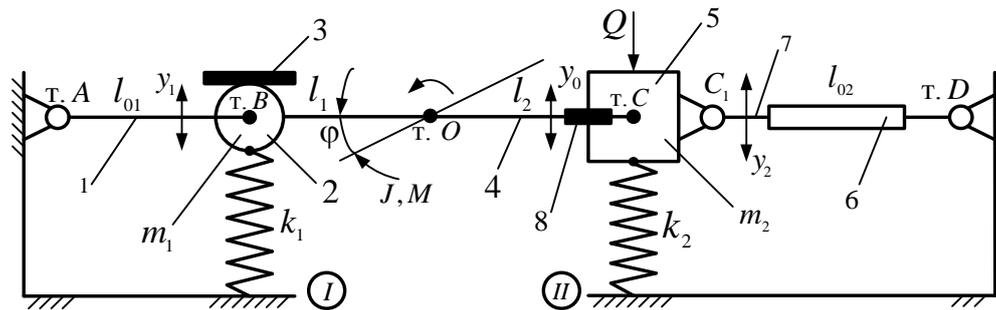
**Ключевые слова:** вибрационный технологический комплекс, динамическое гашение колебаний, межпарциальные связи.

**Введение.** Вибрационные технологические процессы и соответствующее оборудование и машины широко используются в разных отраслях промышленности для решения широкого класса задач, что стимулирует интерес к вопросам поиска способов и средств управления динамическим состоянием технологических комплексов [3, 7, 8]. Взаимодействие элементов вибрационных систем отличается большим разнообразием и существенно зависит от структуры вибрационных полей вибрационных машин или вибростендов [2], также как и конструктивно-технические решения по вибрационному возбуждению колебаний рабочих органов. Вибрационное инерционное возбуждение находит широкое применение в различных производственных процессах, однако такие подходы обладают определенными недостатками, что, в частности, связано с размещением в условиях вибраций достаточно сложных устройств для генерации возмущений [5].

В предлагаемой статье развивается подход к построению вибрационных технологических комплексов, в котором показаны возможности разделения функций рабочего стола с реализацией технологического процесса возбуждения вибраций, в рамках которого используются идеи передачи энергии в режимах динамического гашения колебаний.

**1. Описание рассматриваемого вибростенда. Постановка задачи исследования.**

Рассматривается вибростенд (рис. 1), состоящий из подвижного рабочего блока в виде жесткого невесомого стержня (с малым моментом инерции). По концам стержня в точках *B* и *C* расположены сосредоточенные массы  $m_1$  и  $m_2$ , опирающиеся на упругие элементы с жесткостями  $k_1$  и  $k_2$ . Рабочий блок представляет собой твердое тело массой  $M$  и моментом инерции  $J$  относительно центра тяжести точки *O*. Расстояние до центра тяжести точки *O* составляет  $l_1$  и  $l_2$



**Рис. 1.** Расчетная схема вибрационного технологического стенда

Элементы системы стержень 1 *AB* и трос 6 *CD* обеспечивают вертикальное движение рабочего тела *AB* – позиции 2, 3, 4, 5. Рабочая поверхность 2 предназначена для реализации процесса виброупрочнения деталей. Вибровозбудитель 5 представляет собой устройство с двумя дебалансами. Шарнир *C* имеет приспособление 8 для компенсации продольных составляющих колебаний стержня *CB*. Шарниры *A*, *B*, *C*<sub>1</sub> и *D* обеспечивают возможности вращательных движений (обеспечиваются повороты стержней). Стержень *C*<sub>1</sub>*D* имеет приспособление 6 для натяжения троса, которое регулирует приведенную жесткость системы. Упругие элементы  $k_1$  и  $k_2$  обладают линейными свойствами. Массоинерционные элементы  $m_1$  и  $m_2$  являются составляющими рабочего блока как твердого тела.

В расчетной схеме используются две системы координат, связанные с неподвижным базисом (опорные поверхности – *I* и *II* на рисунке 1) – это  $y_1$  и  $y_2$ , а также  $y_0$  и  $\varphi$ ; при этом  $y_0$  – координата центра тяжести;  $\varphi$  – угол поворота относительно центра тяжести. Предполагается, что центр колебаний не лежит на прямой *BC*, а точка *O* находится на перпендикуляре к прямой *BC*. В связи с этим  $M = m_1 + m_2$ , но  $J \neq m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2$ .

При расчетах используются кинематические соотношения:

$$y_0 = ay_1 + by_2; \varphi = c \cdot (y_2 - y_1); y_1 = y_0 - l_1 \cdot \varphi; y_2 = y_0 + l_2 \cdot \varphi; a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}; b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}; c = \frac{1}{l_1 + l_2}. \quad (1)$$

Вибрационный возбудитель имеет неуравновешенную массу  $m_0$  и эксцентриситет  $r$ . Рассматриваются малые колебания в плоскости; трос 7 *C*<sub>1</sub>*D* с натяжным устройством 6 может создавать постоянные усилия на время рабочего цикла работы вибростенда. Силовое возмущение является гармоническим  $Q_2 = (m_0) \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$  и направлено по вертикали. В первом приближении расчетная схема на рисунке 1 представляет собой твердое тело массой

$M$  и моментом инерции  $J$  относительно центра тяжести, опирающееся на упругие опоры жесткостями  $k_1$  и  $k_2$ .

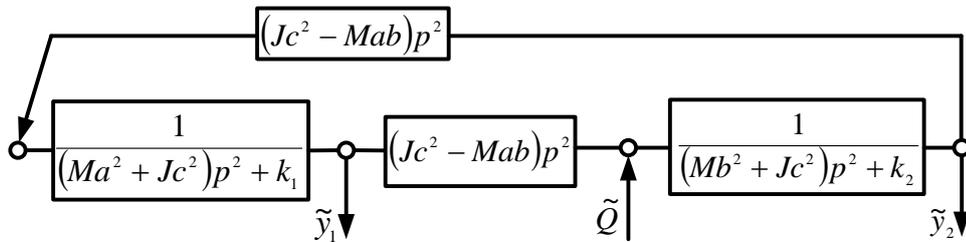
Задача исследования заключается в изучении динамических свойств системы при возмущении по координате  $y_2(Q_2)$ , отражающем внимание к соотношениям координат  $y_1$  и  $y_2$  при различных частотах, а также значениях параметров системы при режиме динамического гашения колебаний по координате  $y_2$ , а по координате  $y_1$  реализуются колебания динамического гасителя.

**2. Математическая модель технологической установки.** При пренебрежении продольными колебаниями вдоль линии расположения характерных точек  $A, B, C, C_1$  и  $D$  и составлении выражений для кинетической и потенциальной энергий, получим уравнения движения системы в координатах  $y_1$  и  $y_2$ :

$$\tilde{y}_1 \cdot [(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] + \tilde{y}_2 \cdot (Mab - Jc^2)p^2 = 0; \quad (2)$$

$$\tilde{y}_2 \cdot [(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] + \tilde{y}_1 \cdot (Mab - Jc^2)p^2 = \tilde{Q}. \quad (3)$$

Структурная схема системы с силовым возмущением по координате  $\tilde{y}_2$  приведена на рис. 2, где  $p = j\omega$  – комплексная переменная, значок  $(\sim)$  означает изображение переменных по Лапласу [5].



**Рис. 2.** Структурная схема вибростенда в координатах  $\tilde{y}_1$  и  $\tilde{y}_2$

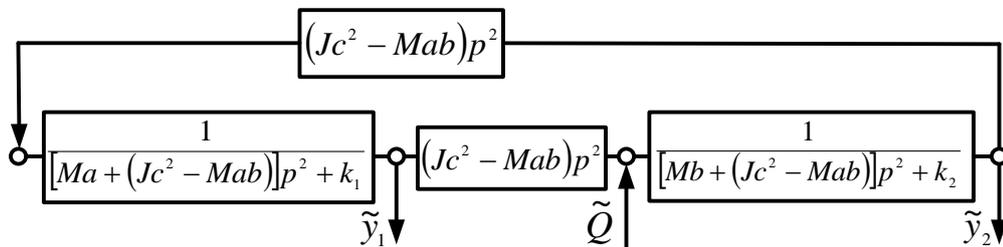
Запишем передаточные функции системы

$$W_1(p) = \frac{\tilde{y}_1}{\tilde{Q}_2} = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{A}; \quad (4) \quad W_2(p) = \frac{\tilde{y}_2}{\tilde{Q}_2} = \frac{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1}{A}; \quad (5)$$

где

$$A = [(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] \cdot [(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] - (Jc^2 - Mab)^2 p^4 \quad (5')$$

частотное уравнение. После ряда преобразований структурную схему на рис. 2 можно представить в виде, как показано на рис. 3. В данном случае  $R = Jc^2 - Mab > 0$ .



**Рис. 3.** Структурная схема вибростенда в форме, соответствующей цепному виду

Для вибростенда (рис. 1) и для структурных схем на рис. 2 и 3 в системе координат  $y_1$  и  $y_2$ , характерно то, что связь между парциальными системами имеет инерционный тип.

При выполнении условия  $Jc^2 - Mab = 0$  система распадается на два независимых блока с параметрами  $Ma^2p^2 + k_1$  и  $Mb^2p^2 + k_2$ . В этом случае движения по координатам  $y_1$  и  $y_2$

становятся независимыми. Такой режим работы для технологического вибростенда не рассматривается. Для случая, определяемого условием  $Jc^2 - Mab \gg 0$ , возможен режим динамического гашения колебаний на элементе  $m_2$  на частоте

$$\omega_{\text{дин.}}^2 = \frac{k_1}{Ma + (Jc^2 - Mab)} = \frac{k_1}{Ma^2 + Jc^2}. \quad (6)$$

В этом случае движение по координате  $y_2$  становится равным нулю (или  $y_2 \rightarrow 0$ ). При динамическом гашении колебаний по координате  $y_2$  вибрационная энергия от инерционного возбудителя передается массоинерционному элементу  $m_1$ , то есть на координату  $y_1$ , что составит

$$\tilde{y}_1 = -\frac{\tilde{Q}_2}{(Jc^2 - Mab)p^2}. \quad (7)$$

Оценка значений (7) может быть проведена при  $Q_2 = (m_0)' \cdot r\omega^2$ . В этом случае амплитуда колебаний по координате  $y_1$  составит

$$y_1 = \frac{m_0 r}{Jc^2 - Mab} = \frac{m_0 r (l_1 + l_2)^2}{J - Ml_1 l_2}. \quad (8)$$

Таким образом, выше приведенные выражения показывают, что регулирование величины  $y_1$  как амплитуды колебаний рабочей площадки вибростенда, целесообразно вести путем изменения момента инерции  $J$  или жесткости  $k_1$ .

**3. Особенности математических моделей.** Соотношения между движениями по координате  $y_1$  и  $y_2$  могут интерпретироваться как рычажные связи, что проявляется в формах колебаний, создаваемых внешним гармоническим воздействием и сохраняется при изменении частоты внешних колебаний (форма колебаний) до определенного значения частоты внешнего возмущения; после чего происходит образование другой формы колебаний. Отношение координат  $\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2}$  в операторном виде может быть получено из структурной схемы на рис. 3 и при входном воздействии  $Q$ , приложенном к элементу  $m_2$  и определяется выражением

$$W_{12}(p) = \frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{[Ma + (Jc^2 - Mab)]p^2 + k_1}, \quad (9)$$

где  $p = j\omega$  – комплексная переменная, значок ( $\sim$ ) – изображению по Лапласу [5].

Парциальная частота системы определится

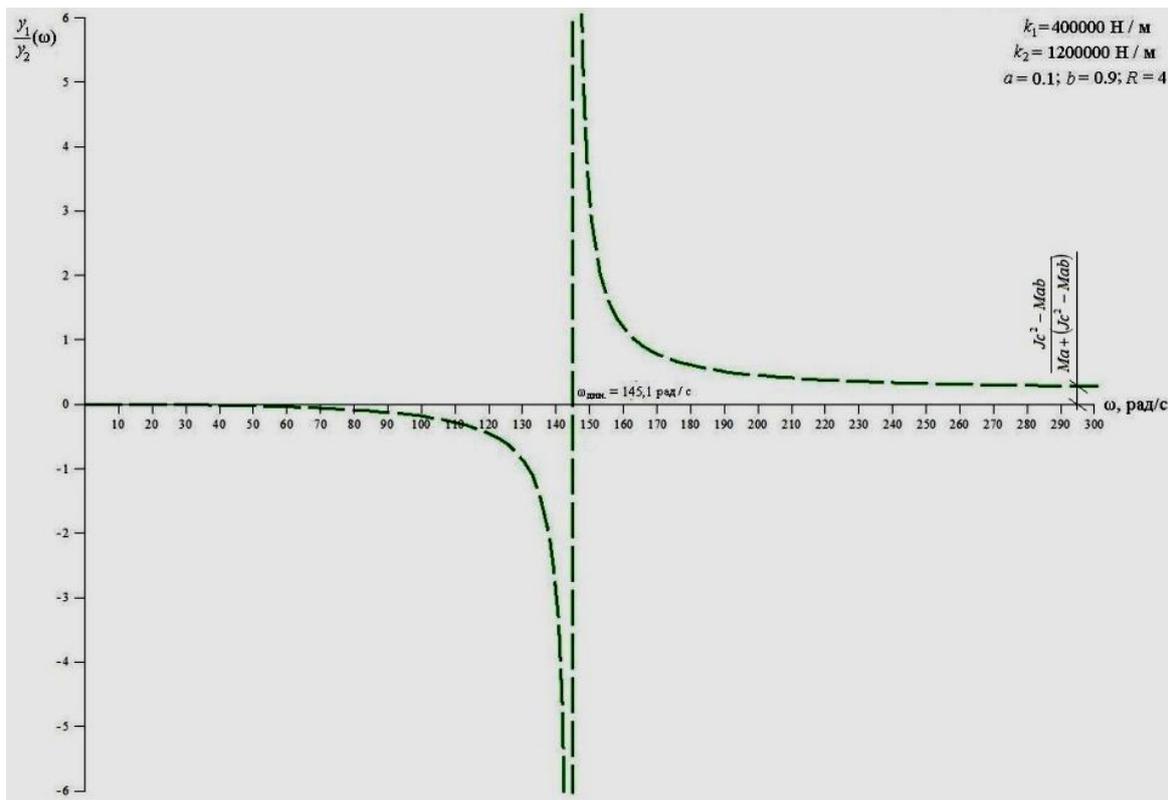
$$n^2 = \omega_{\text{дин.}}^2 = \frac{k_1}{Ma + [Jc^2 - Mab]}. \quad (10)$$

График  $\frac{y_1}{y_2}(\omega)$  на рис. 4 в диапазоне изменения частоты внешнего воздействия от 0 до

$\omega_{\text{дин}}$  имеет отрицательное значение; после перехода  $\omega = \omega_{\text{дин}}$ , отношение  $\frac{y_1}{y_2}$  становится

положительным и стремится при  $\omega \rightarrow \infty$  к пределу, определяемому выражением

$$W_{12}(p) = \frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = \frac{Jc^2 - Mab}{Ma + (Jc^2 - Mab)} < 1. \quad (11)$$



**Рис. 4.** График зависимости  $\frac{y_1}{y_2}$  от частоты  $\omega$  при выполнении условия (10)

В диапазоне частот  $0 - \omega_{\text{дин}}$  форма колебаний такова, что рычажная связь соответствует представлениям о связях, создаваемых рычагом первого рода. При переходе через критическое значение частоты внешнего воздействия, которое совпадает с частотой динамического гашения, происходит смена формы колебаний, а координаты  $y_1$  и  $y_2$  начинают изменяться в противофазе, что соответствует представлениям о связях, формируемых рычагом второго рода. При дальнейшем увеличении частоты внешнего возмущения отношение координат  $\frac{y_1}{y_2}$  стремится к пределу (11) при возмущении по массе  $m_2$ . Таким образом, график  $\frac{y_1}{y_2}(\omega)$  в диапазоне изменения частоты внешнего воздействия от 0 до  $\omega_{\text{дин}}$  имеет отрицательное значение; после перехода  $\omega = \omega_{\text{дин}}$  отношение  $\frac{y_1}{y_2}$  становится положительным и при  $\omega \rightarrow \infty$  стремится к пределу (11) [4, 6].

Величина амплитуды колебаний по координате  $y_1$  определяется выражением (8). На рис. 5 приведены графики  $y_1(\omega)$  и  $y_2(\omega)$  при возбуждении по координате  $y_2$  и выполнении условия  $Jc^2 - Mab > 0$ .

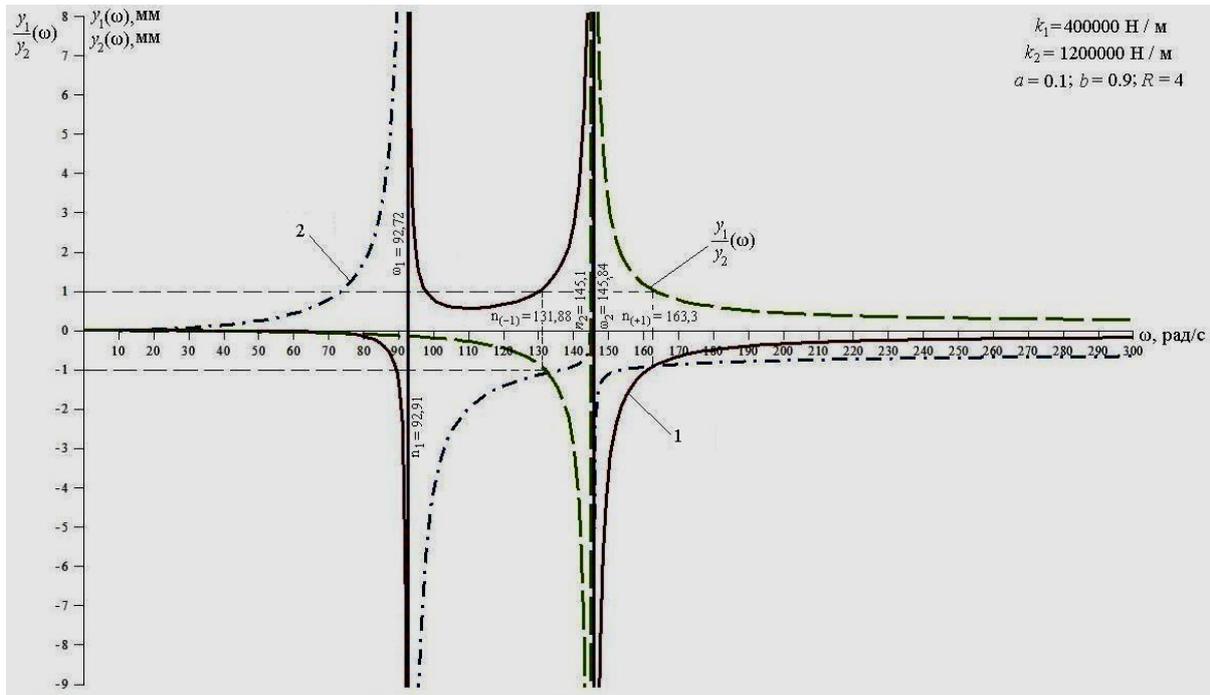
При  $\omega \rightarrow \infty$  график зависимости  $y_1(\omega)$  стремится к пределу

$$\tilde{y}_1 = N_1 = \frac{(Jc^2 - Mab) \cdot m_0 \cdot r}{MJc^2}; \quad (12) \quad \tilde{y}_2 = N_2 = \frac{(Jc^2 - Mab + Mb) \cdot m_0 \cdot r}{MJc^2}. \quad (13)$$

Отношение (12) к выражению (13) соответствует пределу

$$\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2}(p \rightarrow \infty) = \frac{Jc^2 - Mab}{Ma + Jc^2 - Mab}, \quad (14)$$

приведенному на рис. 4.



**Рис. 5.** Графики зависимостей амплитуд колебаний вибростенда от частоты внешнего воздействия: кривая 1 – зависимость  $y_1(\omega)$ ; кривая 2 – зависимость  $y_2(\omega)$

Отметим некоторые соотношения координат  $y_1$  и  $y_2$  при частотах, определяемых из выражения, обозначив на графиках  $y_1(\omega)$  и  $y_2(\omega)$  (рис. 5)  $Mbp^2 + R$

$$W_{12}(p) = \frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{Map^2 + (Jc^2 - Mab)p^2 + k_1}. \quad (15)$$

$\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = 1$  при:

$$\omega_1^2 = \frac{k_2}{Ma}. \quad (16)$$

В свою очередь, при  $\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = -1$  искомая частота определяется

$$\omega_{10}^2 = \frac{k_1}{Ma + 2(Jc^2 - Mab)}. \quad (17)$$

Характерным для взаимного расположения на рис. 5 является пересечение кривой 1 и кривой 2 при частоте  $\omega_1^2$  и отношении амплитуд, равном +1.

**4. Некоторые особенности системы.** Отдельным вопросом в оценке динамических свойств является наличие условия

$$Jc^2 - Mab < 0. \quad (18)$$

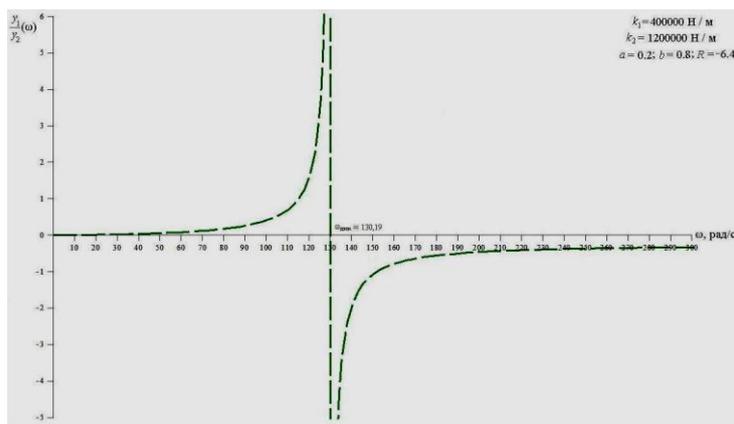
В этом случае

$$\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = \frac{-(Jc^2 - Mab)p^2}{[Ma - (Jc^2 - Mab)p^2] + k_1}, \quad (19)$$

что приводит к несколько иным формам соотношений. Частота динамического гашения колебаний определится

$$\omega_{\text{дин}}^2 = \frac{k_1}{Ma - (Jc^2 - Mab)}. \quad (20)$$

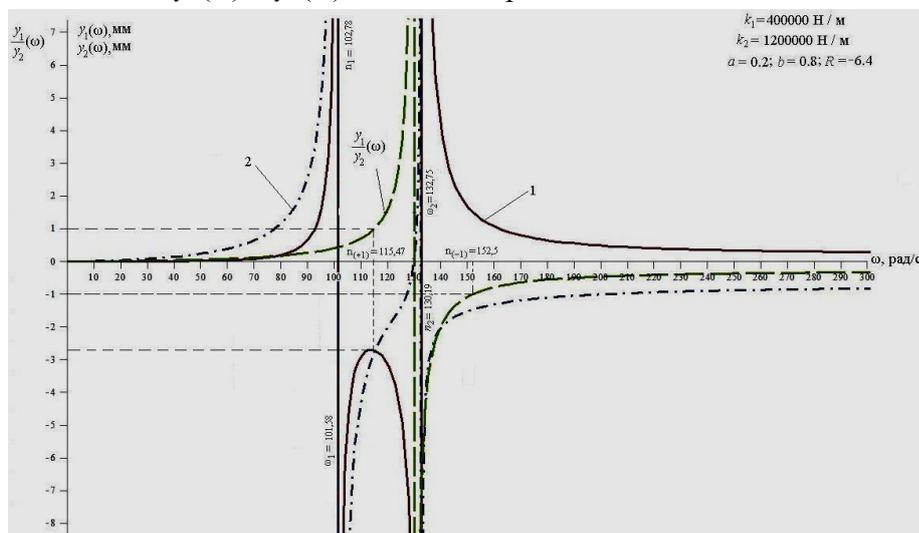
При этом график  $\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2}(\omega)$  примет вид, как показано на рис. 6.



**Рис. 6.** График зависимости  $\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2}(\omega)$  при выполнении условия  $Jc^2 - Mab < 0$

В отличие от выше рассмотренного случая, график  $\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2}(\omega)$  будет иным по сравнению с графиком на рис. 4; в частности, он является зеркальным отражением по форме, но его параметры будут другими, то есть изменятся частота динамического гашения  $\omega_{дин}$  и частоты собственных колебаний  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ; иными также будут и частоты, при которых будут соблюдаться соотношения  $\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = 1$  и  $\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = -1$ ; кроме того, будут другими и предельные значения при увеличении частоты возмущения  $\omega \rightarrow \infty$  [1].

График зависимостей  $y_1(\omega)$  и  $y_2(\omega)$  показан на рис. 7.



**Рис. 7.** Графики зависимостей  $y_1(\omega)$  и  $y_2(\omega)$  от частоты возмущения: кривая 1 –  $y_1(\omega)$ ; кривая 2 –  $y_2(\omega)$  при условии  $Jc^2 - Mab < 0$

**5. Влияние параметров инерционной межпарциальной связи.** Особенности динамических свойств при разных значениях соотношения  $Jc^2 - Mab$ , могут быть представлены в виде трех неравенств

$$Jc^2 - Mab > 0; \quad (21) \quad Jc^2 - Mab = 0; \quad (22) \quad Jc^2 - Mab < 0. \quad (23)$$

Для учета влияния условий (21) - (23) используются следующие выражения

$$W_1(p) = \frac{\tilde{y}_1}{\tilde{Q}_2} = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{A}; \quad (24) \quad W_2(p) = \frac{\tilde{y}_2}{\tilde{Q}_2} = \frac{[Ma + (Jc^2 - Mab)]p^2 + k_1}{A}; \quad (25)$$

$$W_{12}(p) = \frac{\tilde{y}_1}{\tilde{y}_2} = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{[Ma + (Jc^2 - Mab)]p^2 + k_1}. \quad (26)$$

$$A = \{[Ma + (Jc^2 - Mab)]p^2 + k_1\} \cdot \{[Mb + (Jc^2 - Mab)]p^2 + k_2\} - (Jc^2 - Mab)^2 p^4. \quad (27)$$

Для построения математической модели используются следующие параметры:  $M = 150$  кг;  $a = 0,1$  м;  $b = 0,9$  м;  $J = 286$  кг·м<sup>2</sup>;  $Ma = 15$  кг·м;  $Mb = 135$  кг·м;  $R = 4$  кг·м<sup>2</sup>;  $l_1 + l_2 = 4$  м.

На рис. 8 построена диаграмма, позволяющая выбирать параметры вибростенда (например,  $a$  и  $b$ , или массоинерционные параметры  $J$  и  $M$ ), которые обеспечивают необходимые соотношения амплитуд колебаний по координатам  $y_1$  и  $y_2$ .

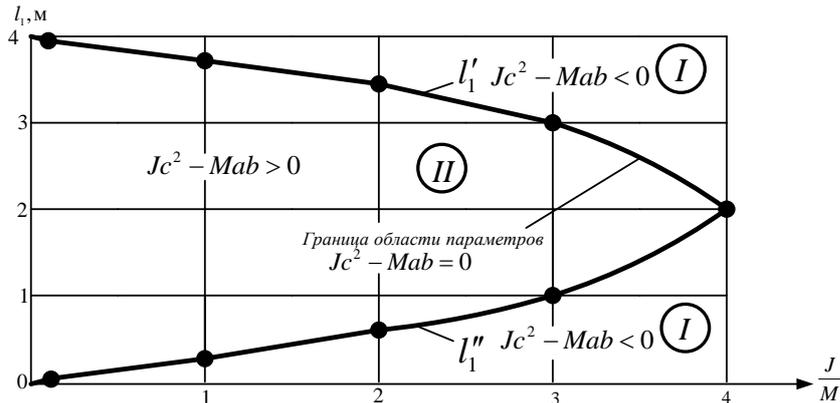


Рис. 8. Диаграмма соотношения параметров  $Jc^2$  и  $Mab$  (при  $l_1 + l_2 = 4$  м)

Если принимать значения  $l_1$  и  $l_2$ , используя кривые  $I$  и  $II$  на рис. 8, то  $l_1 + l_2 = 4$  и для такой точки соотношение  $J/m$  делает  $Jc^2 - Mab = 0$ . В этом случае в системе межпарциальная связь зануляется и, как это было отмечено выше, движение по координатам  $y_1$  и  $y_2$  происходит независимо. Если значения  $l_1$  и  $l_2$  будут выбраны внутри контура, образованного кривыми  $I$  и  $II$ , то  $Jc^2 - Mab > 0$ . При выборе значений  $l_1$  и  $l_2$  в зонах между кривой  $II$  и осью абсцисс, а также между кривой  $I$  (рис. 8) и прямой, параллельной оси абсцисс и выходящей из точки  $l = 4$  на оси ординат, выполняется условие  $Jc^2 - Mab < 0$ .

Рассмотрим более подробно, как изменяются некоторые частотные характеристики при разных значениях  $Jc^2 - Mab = R$ .

$$A. R > 0, n_{+1}^2 = \frac{k_2}{Mb + Jc^2 - Mab}. R < 0, n_{+1}^2 = \frac{k_2}{Mb - R}.$$

Отметим, что  $n_{+1}^2 > n_{+1}^2$ , то есть изменение парциальной частоты, на которой отношение амплитуд  $\frac{y_1}{y_2} = +1$ , пропорционально изменению соотношения  $Jc^2 - Mab$ . В случае  $R > 0$  частота  $n_{+1}$  находится правее границы собственной частоты  $\omega_2$ , а при  $R < 0$  – в межпарциальной зоне частот подсистем  $n_1$  и  $n_2$ .

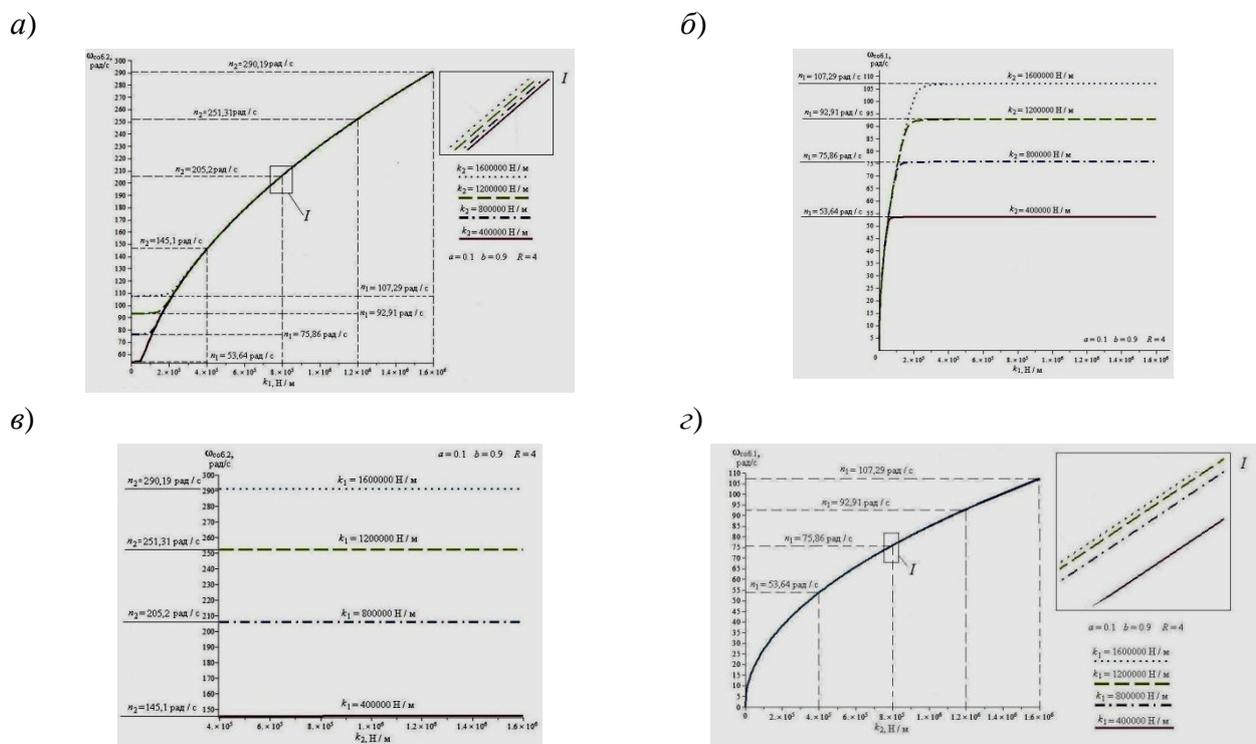
$$B. R > 0, n_2^2 = \frac{k_1}{Ma + (Jc^2 - Mab)}. \text{ При } R < 0 n_2^2 = \frac{k_1}{Ma - R}.$$

Отметим, что  $n_{-1}^2 < n_{-1}^2$ , то есть изменение парциальной частоты, на которой отношение амплитуд  $\frac{y_1}{y_2} = -1$ , обратно пропорционально изменению соотношения  $Jc^2 - Mab$ .

В случае  $R > 0$  частота  $n_{-1}$  находится в зоне частот  $n_1$  и  $n_2$ , а при  $R < 0$  – правее границы собственной частоты  $\omega_2$ .

С. При  $R = 0$ .  $n_{+1}^2 = n_{+1}^2$ ;  $n_{-1}^2 = n_{-1}^2$ . В данном случае система распадается на две независимых подсистемы и инерционные связи отсутствуют.

На рис. 9 и 10 приведены зависимости собственных частот от жесткостей упругих элементов при различных соотношениях  $Jc^2 - Mab$ .

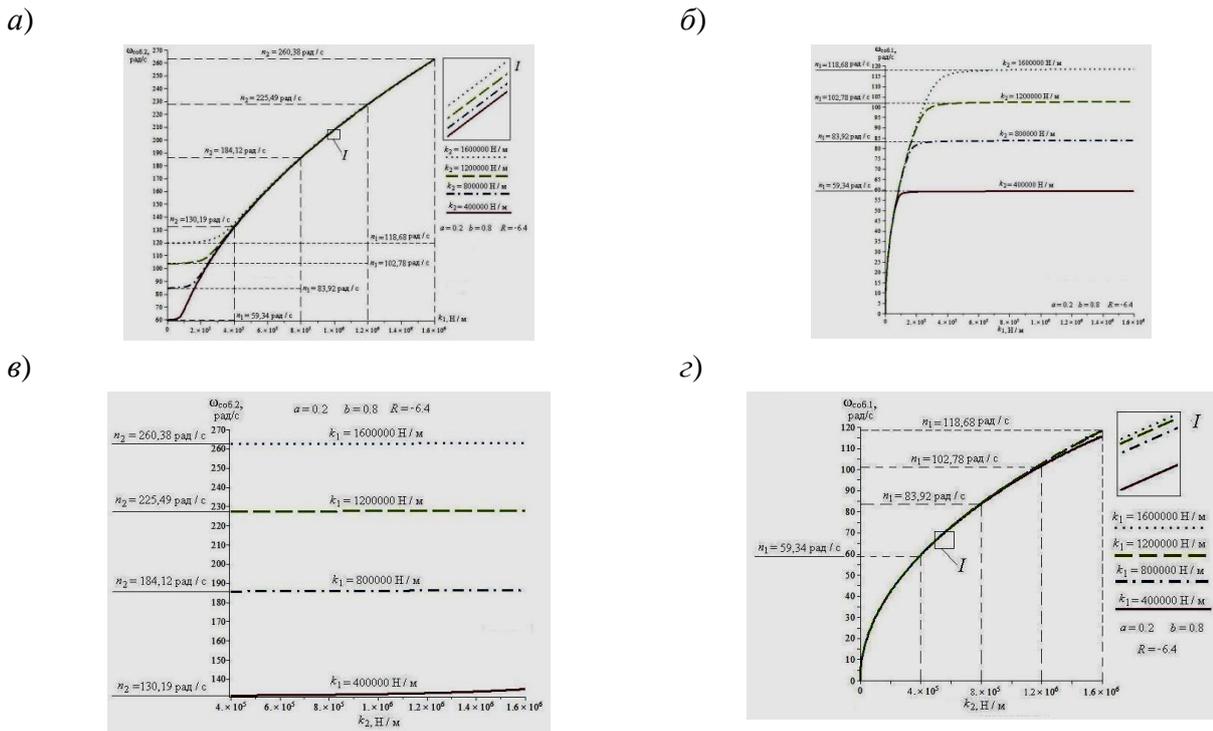


**Рис. 9.** Зависимость собственных частот от жесткостей упругих элементов при  $Jc^2 - Mab > 0$ : а – зависимость верхнего значения собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_1$ ; б – зависимость нижнего значения собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_1$ ; в – зависимость верхнего значения собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_2$ ; г – зависимость верхнего значения собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_2$

Асимптотическое приближение кривых на некоторых графиках объясняется близостью собственных и парциальных частот. Прямолинейность зависимости  $\omega_{\text{соб.2}}(k_2)$  для каждого из случаев  $R$  объясняется полученными значениями собственных частот и расположением кривых на одном графике.

**Заключение.** Анализ приведенных графиков позволяет сделать ряд выводов: парциальные частоты систем близки к собственным частотам, но не выходят за их пределы; на парциальной частоте  $n_2$  наблюдаются малые значения амплитуды колебаний, т.е. обеспечивается режим динамического гашения на вибровозбудителе; в зависимости от соотношения параметров  $a$ ,  $b$  и  $J$  изменяются значения частот, при которых рабочий орган выполняет функции рычагов первого и второго родов: при  $R > 0$  рабочий орган ведет себя как рычаг первого рода в зарезонансной области, а как рычаг второго рода – в межрезонансной области; при  $R < 0$  рабочий орган ведет себя как рычаг первого рода в межрезонансной области, а как рычаг второго рода – в зарезонансной области; при

увеличении жесткостей упругих опор  $k_1$  и  $k_2$  собственные и парциальные частоты увеличиваются согласно квадратичной зависимости; при настройке вибрационного стенда от жесткости  $k_1$  зависят значения верхних границ парциальных и собственных частот рабочих частей, а от жесткости  $k_2$  – нижние границы парциальных и собственных частот; при изменении инерционного параметра  $R$  в меньшую сторону уменьшаются и значения собственных и парциальных частот. Данные вычислительного моделирования отражают параметры работы вибрационного технологического комплекса для прочностных испытаний технических объектов на одном из предприятий региона.



**Рис. 10.** Зависимость собственных частот от жесткостей упругих элементов при  $Jc^2 - Mab < 0$ : а – график зависимости собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_1$  на верхних значениях парциальных частот; б – график зависимости собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_1$  на нижних значениях парциальных частот; в – график зависимости собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_2$  на верхних значениях парциальных частот; г – график зависимости собственных частот колебаний системы от жесткости упругого элемента  $k_2$  на нижних значениях парциальных частот

Точность расчетов по оценке частот колебаний системы в стационарном режиме ( $\approx 30$  Гц) и амплитудах колебаний обеспечивается в пределах 5 – 7 %, что соответствует техническим регламентам эксплуатации комплекса. Методические материалы и рекомендации переданы предприятию для использования в задачах практического назначения, имеются акты внедрения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белокобыльский С.В., Елисеев С.В., Кашуба В.Б., Нгуен Д.Х. Соотношения координат движения элементов механических колебательных систем как форма проявления рычажных связей // Системы. Методы. Технологии. 2015. №3 (27). С. 7-14.

2. Вибрации в технике: справочник в 6 томах / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение. 1981. Т. 4: Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавенделла, 1981. 509 с.
  3. Елисеев А.В., Сельвинский В.В., Елисеев С.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неударяющих связей. Новосибирск: Наука. 2015. 332 с.
  4. Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Каимов Е.В. К вопросу о теории рычажных связей в динамике механических колебательных систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12(107). С. 30-40.
  5. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем. Новосибирск: Наука. 2011. 384 с.
  6. Каимов Е.В., Пнев А.Г., Елисеев С.В., Елисеев А.В., Сигачев Н.П., Нгуен Х.Д. Методика расчета параметров вибрационного технологического комплекса. Иркутск. 2015. 30 с. Деп. в ВИНТИ РАН 05.10.2015, №159.
  7. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга». 2011. 568 с.
  8. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов: монография. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Институт компьютерных исследований. 2006. 176 с.
- 

**UDK 534-16; 531.8; 62.752; 621.01; 621.8.02**

**DYNAMICAL ABSORPTION OF OSCILLATION IN SYSTEM STRUCTURE  
OF VIBRATIONS EXCITATION**

**Andrey V. Eliseev**

Ph.D., senior researcher, e-mail: eavsh@ya.ru

**Evgeniy V. Kaimov**

Ph.D., young researcher, e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru

**Nguyen Duc Huynh**

Post graduate student, e-mail: huynhnd1987@gmail.com

**Vuong Quang Truc**

Post graduate student, e-mail: [trucvq1990@gmail.com](mailto:trucvq1990@gmail.com)

Science-educational center of modern technologies, system analysis and modeling, Irkutsk State Transport University, 15, str. Chernishevskogo, Irkutsk, 664074

**Abstract.** The mathematical model of the vibrostand with inertial excitation is developed and analytical ratios are offered. Transfer function of between-partial ties is introduced. Control of a vibration field is carried out by a choice of the mass-inertial the parameters connected with work mount moment of inertia, its weight and an arrangement of the center of gravity. For control of parameters of a dynamic condition of mechanical oscillatory system transfer functions and frequency characteristics are used.

The concept of steering of parameters of a vibration field is based on use of effects of dynamic absorber of oscillations. Conditions for drop of loads of the activator and provision the necessary level of road ability in a choice of parameters of a vibration field of a working zone of a vibrotable are obtained. Results of numerical experiment are given. The calculation procedure is offered.

**Key words:** vibration technological complex, dynamic blanking out of fluctuations, between-partial ties.

### References

1. Belokobyl'skiy S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B., Nguen Kh.D. Sootnosheniya koordinat dvizheniya elementov mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem kak forma proyavleniya rychazhnykh svyazei [Coordinates ratios of elements movement of mechanical oscillation systems as form of exhibition of lever ties] // Systems. Methods. Technologies. 2015. №3 (27). Pp. 7-14.
2. Vibratsii v tekhnike [Vibrations in techniques: handbook in 6 volumes] / Ed. board: V.B. Chelomey (chair). M.: Mechanical engineering. 1981. V. 4: Vibration processes and machines / ed. by E.E. Lavendell, 1981. 509 p.
3. Eliseev A.V., Sel'vinckii V.V., Eliseev S.V. Dinamika vibratsionnykh vzaimodeistvii elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom neuderzhivnykh svyazei [Dynamics of vibration interactions of elements of technological systems with accounting of not-holding tie]. Novosibirsk: Science. 2015. 332 p.
4. Eliseev S.V., Kuznetsov H.K., Kaimov E.V. K voprosu o teorii rychazhnykh svyazei v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem [To the question about theory of lever ties in dynamics of mechanical oscillatory systems] // Vestnik of Irkutsk State Technical University. 2015. № 12 (107). Pp. 30-40.
5. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P. Mekhatronnye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem [Mechatronics approaches in dynamics of mechanical oscillatory systems]. Novosibirsk. Nauka. 2011. 384 p.
6. Kaimov E.V., Pnev A.G., Eliseev S.V., Eliseev A.V., Sigachev N.P., Nguen Kh.D. Metodika rascheta parametrov vibratsionnogo tekhnologicheskogo kompleksa [Methodics of computation of parameters of vibration technological complex]. Irkutsk. 2015. 30 p. Dep. in VINITI 05.10.2015 №159 – V 2015.
7. Kopylov Yu.R. Dinamika protsessov vibroudarnogo uprochneniya [Dynamics of processes of vibro-shock hardening. Voronezh: «Science book». 2011. 568 p.
8. Panovko G.Ya. Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov [Dynamics of vibration technological processes]. M.: Izevsk: SRC «Regular and chaotic dynamics», Institute of computer researches. 2006. 176 p.

УДК 621.331

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ОСНАЩЕННЫХ СИММЕТРИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

**Закарюкин Василий Пантелеймонович**

Д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»,  
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15, e-mail: zakar49@mail.ru

**Крюков Андрей Васильевич**

Д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»,  
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15;

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Авдиенко Илья Михайлович**

Аспирант, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»,  
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15, e-mail: av.ila@mail.ru

**Аннотация.** Для снижения несимметрии в системе электроснабжения железной дороги переменного тока 27.5 кВ используют три типа фазировки подключения трансформаторов на тяговых подстанциях. Этот способ не дает достаточного эффекта, особенно при малой мощности питающей электроэнергетической системы, когда мощности короткого замыкания на шинах тяговых подстанций не превышают 1000 МВ·А. Устранение несимметрии может осуществляться на основе симметрирующих трансформаторов, однако методы расчетов режимов систем тягового электроснабжения (СТЭ) с такими трансформаторами практически отсутствуют.

В статье рассмотрены вопросы моделирования СТЭ, оснащенных симметрирующими устройствами, на основе методов, разработанных в ИрГУПС. Проанализирована эффективность применения симметрирующих трансформаторов Скотта, Б.М. Бородулина, также устройства, реализованного на основе схемы Штайнмеца. Положительный эффект симметрирующих установок зависит от соотношения нагрузок плеч питания, то есть от электропотребления поездами и графика их движения. Наибольший эффект имеет место при соизмеримых размерах движения поездов с одинаковым токовым профилем по обе стороны от подстанции с симметрирующим трансформатором. Для реализации такой ситуации при моделировании использовались идеализированные токовые профили поездов и график движения.

Результаты компьютерного моделирования на основе программного комплекса Fazonord свидетельствуют о достаточно высокой эффективности применения симметрирующих устройств. Имеет место существенное снижение несимметрии напряжений на шинах питающего напряжения подстанций по сравнению с традиционной системой тягового электроснабжения 27.5 кВ.

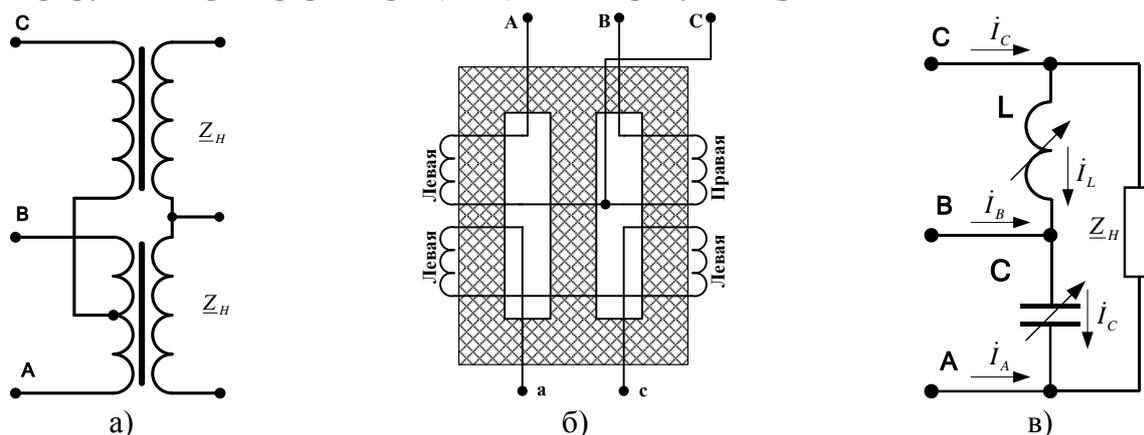
**Ключевые слова:** системы электроснабжения железных дорог, симметрирующие трансформаторы, имитационное моделирование в фазных координатах.

**Введение.** Однофазные тяговые нагрузки электрифицированной железной дороги переменного тока создают существенную несимметрию в питающей трехфазной сети. Для ее снижения традиционно применяется три типа тяговых подстанций (ТП) по фазировке подключения трансформаторов [1, 15]. Такое присоединение ТП дает недостаточный эффект симметрирования, особенно для питающих электроэнергетических систем (ЭЭС) с мощностями коротких замыканий, не превышающими 1000 МВ·А. Одна из причин малой эффективности традиционного способа симметрирования состоит в наличии отдельных межподстанционных зон, расположенных на перевальных участках с резко выделяющимся энергопотреблением. Другая причина связана с неравномерностью движения поездов повышенной массы, вследствие чего нагрузки шести тяговых подстанций, образующих «винт», редко бывают сравнимыми по величине. Кроме того, точками присоединения тяговых подстанций к сетям 110-220 кВ являются вводы питающих ЛЭП 110-220 кВ, а не границы сетевого района, питающего группу тяговых подстанций. Эти обстоятельства приводят к росту одного из важнейших показателей качества электроэнергии – несимметрии напряжений питающей ЭЭС по обратной последовательности. Поэтому требуется разработка более эффективных технических решений по симметрированию тяговой нагрузки, что, в свою очередь, приводит к необходимости создания методов анализа режимов систем с устройствами симметрирования.

**1. Схемы симметрирования.** Из известных технических решений по снижению несимметрии, создаваемой тяговыми нагрузками, можно выделить следующие схемы:

- для симметрирования двухфазной нагрузки путем формирования напряжений, отличающихся по фазе на  $90^\circ$ ;
- для симметрирования на базе индуктивных и емкостных элементов.

К первому типу можно отнести схему Скотта [3] с двумя однофазными трансформаторами (рис. 1а), а также трехфазные трансформаторы, описанные в работах [14, 16] и реализующие тот же эффект одним трехфазным трансформатором, двухфазные симметрирующие трансформаторы (ДСТ) Б.М. Бородулина (рис. 1б) [2].



**Рис. 1.** Схемы симметрирующих устройств:

а – схема Скотта; б – схема ДСТ Бородулина; в – схема Штайнмеца

Применение при модернизации систем тягового электроснабжения (СТЭ) технических решений первого типа требует замены существующего оборудования, что далеко не всегда приемлемо. Кроме того, трехфазные трансформаторы с большим количеством обмоток отличаются значительными напряжениями короткого замыкания, что

неблагоприятно сказывается на симметрирующем эффекте. В этом плане выгодно отличаются ДСТ, достоинством которых является возможность модернизации существующих ТП без замены тяговых трансформаторов. Однако их применение требует значительного увеличения трансформаторной мощности ТП.

В целом первая группа методов симметрирования, использующая питание плеч подстанций напряжениями, отличающихся по фазе на  $90^\circ$ , обладает существенным недостатком, заключающимся в том, что наибольший эффект симметрирования имеет место при двух равных по величине нагрузках.

Схемы симметрирования второго типа предполагают включение регулируемых реакторов и конденсаторных батарей на двух или трех фазах трехфазной системы [16]. Широкое распространение получила схема Штайнмеца (рис. 1в), создающая наибольший эффект при чисто активной нагрузке. В случае однофазной нагрузки в свободные фазы включаются реактор и батарея конденсаторов, реактивные мощности которых в  $\sqrt{3}$  раз меньше мощности симметрируемой нагрузки. Достоинством схемы является равенство номинальной трехфазной мощности трансформатора и активной мощности однофазной нагрузки, поэтому ее применение в СТЭ 25 кВ позволит полностью использовать мощность трансформатора для питания тяги поездов.

Схема Штайнмеца обеспечивает симметрирование и активно-индуктивной нагрузки, однако общий коэффициент мощности при этом снижается. Кроме того, для эффективного применения схемы требуется использование регулируемых индуктивно-емкостных элементов с высоким быстродействием. Разработанные в последние годы регулируемые источники реактивной мощности снижают остроту этой проблемы, однако стоимость такого оборудования остается высокой. Для симметрирования двухфазной тяговой нагрузки потребуются установка индуктивно-емкостных элементов на три фазы с разработкой алгоритма управления ими с учетом необходимости компенсации реактивной мощности и симметрирования тяговых нагрузок.

Вопросы моделирования СТЭ с симметрирующими трансформаторами некоторых типов рассмотрены в работах [5 - 9]. Ниже представлены результаты исследований, направленных на разработку технологий имитационного моделирования режимов СТЭ, оснащенных симметрирующими устройствами, выполненными по схемам Скотта и Штайнмеца, а также СТЭ, в которых используются ДСТ Б.М. Бородулина.

**2. Методика моделирования.** Система электроснабжения железной дороги (СЭЖД) переменного тока формируется на основе трехфазно-однофазных электрических сетей, для моделирования которых целесообразно использовать фазные координаты [4, 12]. В ИрГУПС разработаны методы моделирования СЭЖД в фазных координатах, базирующиеся на применении решетчатых схем замещения (РСЗ), которые представляют собой RLC – элементы, соединенные в схемы полных графов. Для РСЗ можно записать следующее формализованное определение:

$$TEC : hub \cup con, \forall i, j \in hub \rightarrow con_{i,j} \subset con,$$

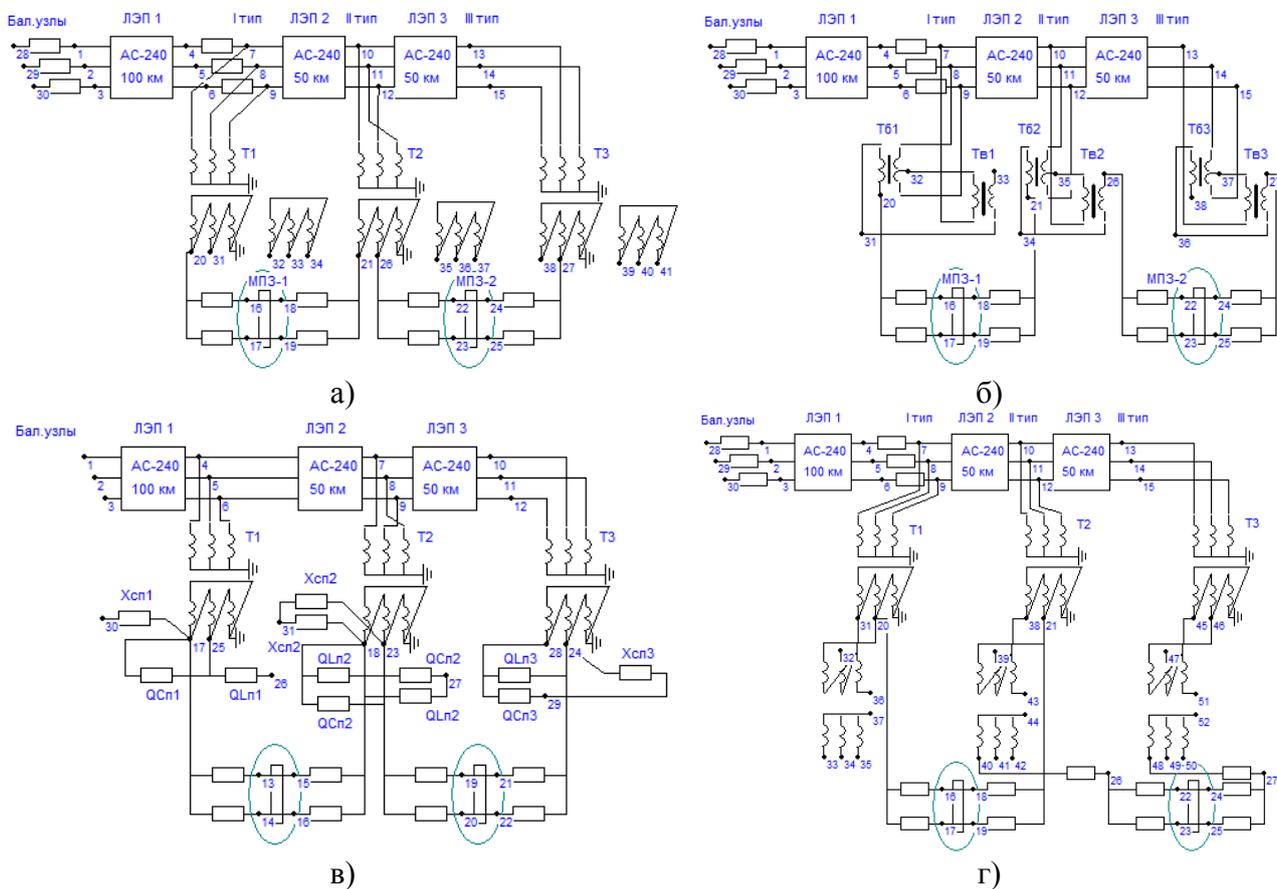
где  $TEC$  – обозначение РСЗ;  $hub$  – множество узлов РСЗ;  $con$  – множество ветвей РСЗ.

С помощью объединения РСЗ отдельных элементов трехфазно-однофазной сети в единую расчетную схему может быть сформирована модель для расчета режимов.

Технология моделирования режимов СЭЖД с использованием РСЗ реализована в

программном комплексе Fazonord, позволяющим создавать модели однофазных и трехфазных трансформаторов с любыми применяемыми на практике схемами соединения обмоток. Принципы работы комплекса изложены в работах [4, 12], а результаты исследований, направленных на разработку методов управления режимами сложных СЭЖД и СТЭ, представлены в работах [11, 13].

**3. Результаты моделирования.** Эффект использования симметрирующих трансформаторов исследовался путем имитационного моделирования работы СТЭ 25 кВ с помощью расчетных схем, приведенных на рис. 2. Модели включали в свой состав сеть внешнего электроснабжения с напряжением балансирующих узлов 230 кВ, ЛЭП 220 кВ, выполненные проводом АС-240, тяговые трансформаторы мощностью 40000 кВ·А каждый и две межподстанционные зоны двухпутного участка протяженностями по 50 км с контактной подвеской ПБСМ95+МФ100. Имитационное моделирование работы системы электроснабжения при движении поездов проведено с помощью программного комплекса Fazonord [4, 12] в предположении пропуска пяти четных и такого же числа нечетных поездов.

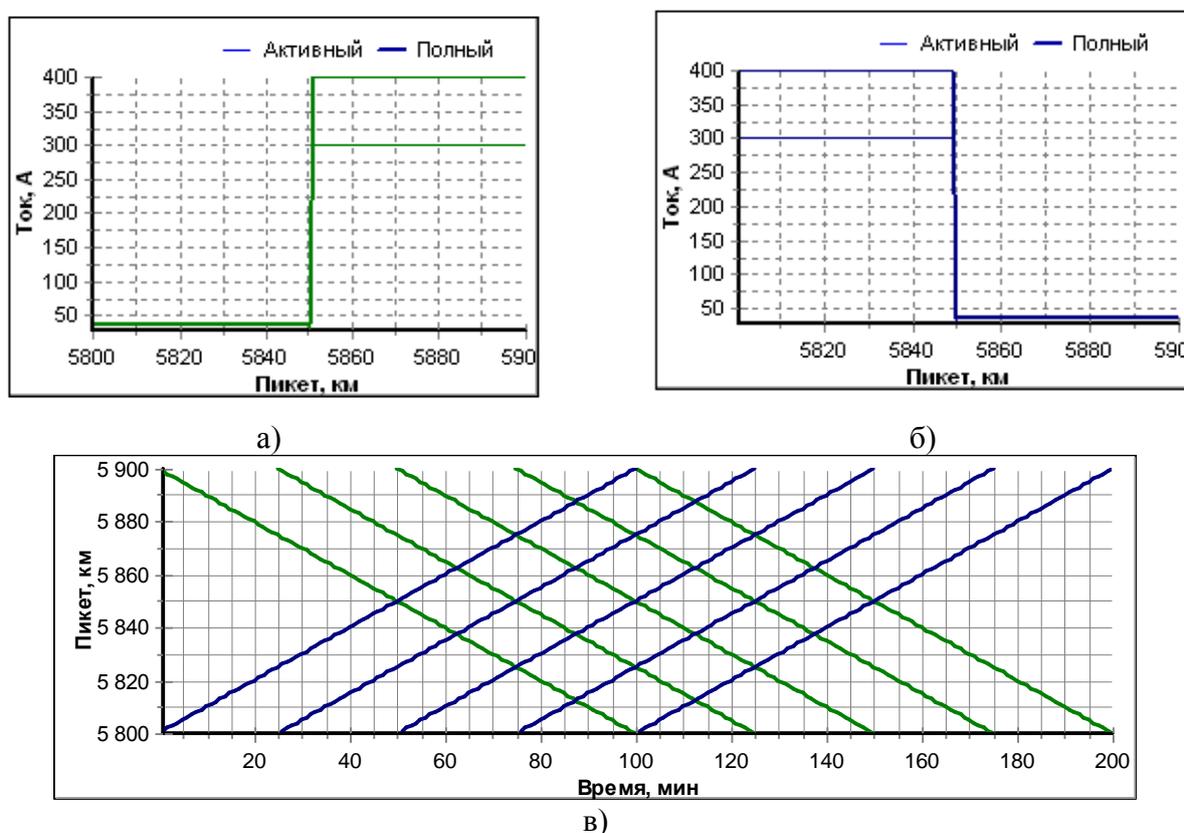


**Рис. 2.** Расчетные схемы ПК Fazonord: а – классическая СТЭ 27.5 кВ; б – СТЭ с трансформаторами Скотта; в – СТЭ с симметрирующими устройствами, реализованными на основе схемы Штайнмеца; г – СТЭ с трансформаторами Б.М. Бородулина

Положительный эффект симметрирующего трансформатора (СТ) зависит от соотношения нагрузок плеч питания, то есть от токопотребления поездами и графика их движения. Наибольший эффект наблюдается при соизмеримых размерах движения поездов с одинаковым токовым профилем по обе стороны от подстанции с симметрирующим

трансформатором. Для реализации такой ситуации при моделировании использовались идеализированные токовые профили поездов (рис. 3а и 3б) и график движения (рис. 3в), обеспечивающие одинаковые нагрузки плеч трансформатора Т2. Трансформаторы Т1 и Т3 остаются нагруженными на одно плечо.

Применение схемы Штайнмеца связано с необходимостью использования регулируемых конденсаторных и реакторных установок с высоким быстродействием и с требуемой большой реактивной мощностью в десятки Мвар. Это создает некоторые алгоритмические трудности при имитационном моделировании работы такой схемы при движении поездов. В качестве приближенного решения может рассматриваться применение нерегулируемых элементов со средними для данной поездной ситуации параметрами. В табл. 1 представлены результаты оценки параметров нерегулируемых элементов схемы Штайнмеца для симметрирования средних тяговых нагрузок при условии применения емкостной компенсации реактивной мощности, потребляемой с плеч питания подстанций.



**Рис. 3. Токовые профили поездов и график их движения:**

а – токовый профиль нечетного поезда; б – токовый профиль четного поезда;  
 в – график движения

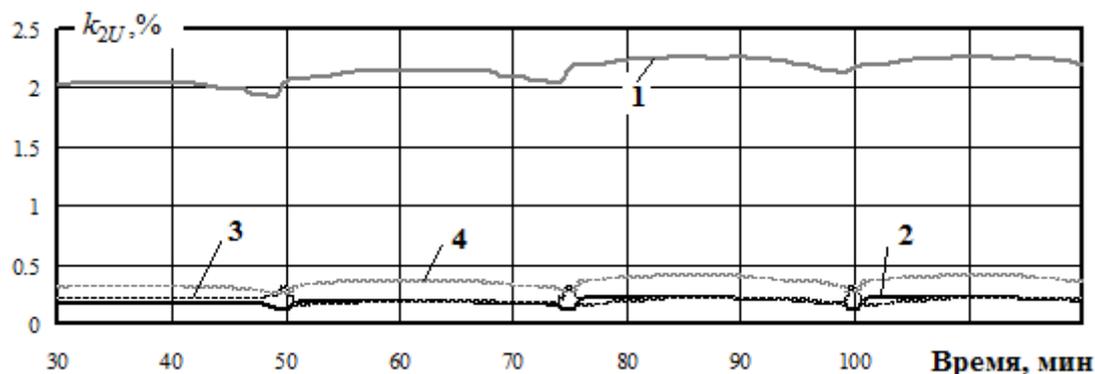
**Таблица 1. Оценки параметров нерегулируемых элементов схемы Штайнмеца**

Плечо	$R_{\text{ЭКВ}}, \text{ Ом}$	$X_{\text{ЭКВ}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ЭКВ}}^{(1)}, \text{ Ом}$	$X_{\text{ЭКВ}}^{(1)}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ЭКВ}}^{(S)}, \text{ Ом}$
ПП-Т1	95,5	156,5	103,8	170	180
ЛП-Т2	133,3	139,0	139,1	145	241
ПП-Т2	113,5	183,9	129,6	210	224
ЛП-Т3	119,9	135,7	141,4	160	245

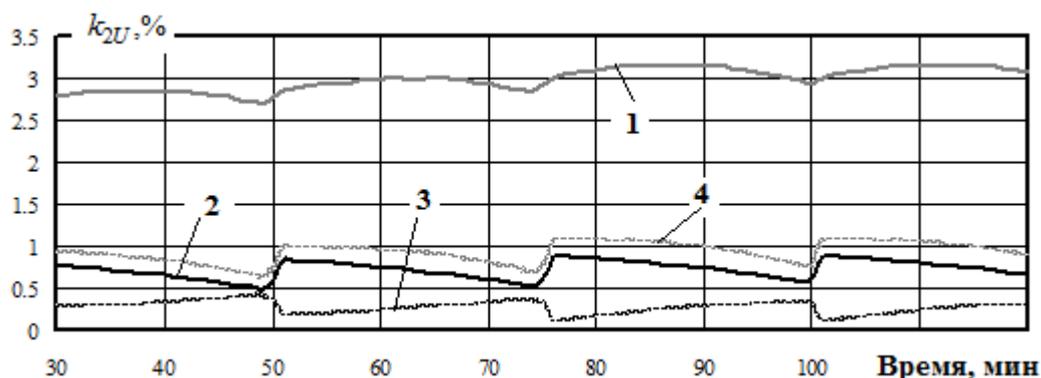
Примечания. ПП – правое плечо питания; ЛП – левое плечо;  $R_{\text{ЭКВ}}, X_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентные сопротивления нагрузок плеч;  $R_{\text{ЭКВ}}^{(1)}, X_{\text{ЭКВ}}^{(1)}$  – увеличенные примерно в 1,1 раза значения сопротивлений для учета увеличения средних напряжений за счет компенсации реактивной мощности;

$R_{\text{ЭКВ}}^{(S)} = 1.732 \cdot R_{\text{ЭКВ}}^{(1)}$  – значения сопротивлений элементов схемы Штайнмеца.

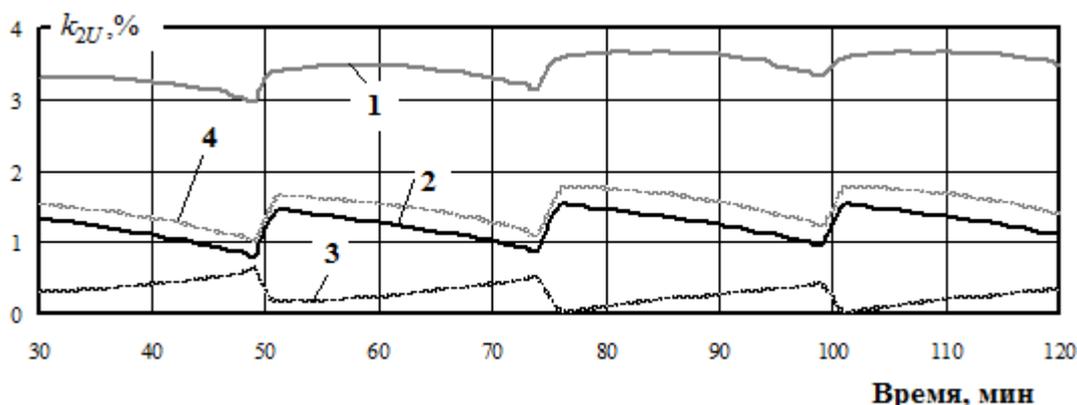
Результаты моделирования в виде графиков зависимостей коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на шинах питающего напряжения Т1, Т2, Т3 от времени приведены на рис. 4 - 6. Интегральные результаты моделирования сведены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 7.



**Рис. 4.** Динамика изменения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения Т1: 1 – классическая СТЭ; 2 – СТЭ с трансформаторами Скотта; 3 – СТЭ с симметрирующими устройствами, реализованными на основе схемы Штайнмеца; 4 – СТЭ с трансформаторами Б.М. Бородулина



**Рис. 5.** Динамика изменения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения Т2; обозначения по рис. 4

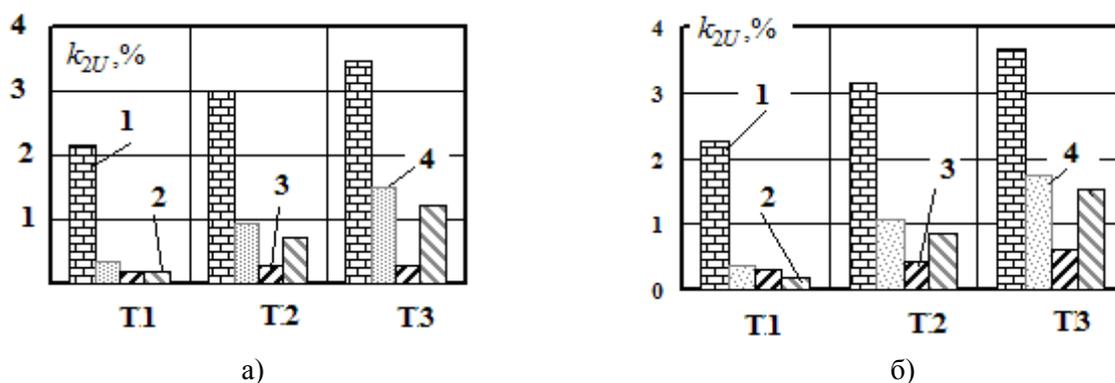


**Рис. 6.** Динамика изменения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения Т3; обозначения по рис. 4

**Таблица 2.** Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

ТП	Показатель	Схема СТЭ				Различие, %		
		1	2	3	4	Между 1 и 2	Между 1 и 3	Между 1 и 4
Т1	Среднее значение	2.15	0.19	0.20	0.35	<b>91.2</b>	90.6	83.6
	Максимум	2.26	0.21	0.31	0.40	<b>90.7</b>	86.3	82.3
Т2	Среднее значение	2.98	0.72	0.27	0.93	75.9	<b>90.8</b>	68.7
	Максимум	3.15	0.87	0.43	1.08	72.4	<b>86.3</b>	65.7
Т3	Среднее значение	3.45	1.23	0.29	1.50	64.2	<b>91.7</b>	56.4
	Максимум	3.67	1.53	0.62	1.76	58.3	<b>83.1</b>	52.0

Примечание. Обозначения такие же, как на рис. 4; жирным шрифтом выделены варианты с максимальным эффектом, курсивом – с минимальным.



**Рис. 7.** Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности:  
а – средние значения; б – максимумы

Результаты моделирования показывают высокую эффективность применения симметрирующих трансформаторов. В зависимости от типа СТ средние и максимальные значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности снижаются на 50 - 90 %. Наибольший эффект наблюдается в СТЭ, использующих симметрирующие устройства по схеме Штайнмеца и Скотта, наименьший – для СТЭ с ДСТ.

Периодичность зависимостей, представленных на рис. 4 - 6, обусловлена движением поездов с интервалами 25 мин. Сравнительно небольшие изменения коэффициентов несимметрии во времени связаны с принятой формой токовых профилей поездов.

Полученные результаты при идеализированных токовых профилях и графиках движения поездов характеризуют потенциальные возможности симметрирования рассмотренных выше технических решений. Конкретный тип симметрирующего устройства необходимо выбирать на основе детального моделирования конкретной СТЭ с применением предлагаемой методики имитационного моделирования, а также использовать технико-экономическое сравнение вариантов симметрирования.

**Заключение.** На основе методов моделирования систем электроснабжения железных дорог, разработанных в ИрГУПС, реализованы модели симметрирующих устройств по схемам Скотта, Штайнмеца и Б.М. Бородулина, предназначенные для расчетов режимов СТЭ с такими устройствами. В приведенном примере имитационного моделирования режимов системы электроснабжения при идеализированном профиле токопотребления снижение

несимметрии напряжений на шинах питающего напряжения подстанций, оснащенных симметрирующими трансформаторами, по сравнению с традиционной СТЭ 25 кВ составило от 2 до 10 раз. Наиболее эффективной является схема Штайнмеца, позволяющая к тому же компенсировать реактивную мощность тяговых нагрузок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардушко В.Д., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Принципы построения систем электроснабжения железнодорожного транспорта. Москва: Теплотехник. 2014. 166 с.
2. Бородулин Б.М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2003. № 2. С. 14 - 17.
3. Ворфоломеев Г.Н. Схема Скотта: история и перспективы совершенствования (к столетию создания) // Электричество. 1994. № 10. С. 74-77.
4. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. 273 с.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Имитационное моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. № 2 (4) 2015. С. 11-17.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Математические модели симметрирующих трансформаторов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Часть I. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 121-128.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Моделирование систем тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск: ИрГУПС. 2015. Т.1. С.599-604.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Авдиенко И.М. Устранение несимметрии в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 1(49). 2016. С. 189-195.
9. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Иванова Е.С. Анализ схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока // Системы. Методы. Технологии. № 4(20). 2013. С. 68-83.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: Издательство ИрНИТУ. 2015. 218 С.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС. 2015. 180 с.
12. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС. 2011. 170 с.
13. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Абрамов Н.А. Управление системами тягового электроснабжения железных дорог // Управление большими системами. Вып. 29. М.: ИПУ РАН. 2010. С. 201-213.
14. Мамошин Р.Р., Бородулин Б.М., Зельвянский А.Я., Титов А.Ф. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом // Вестник ВНИИЖТ. 1989. № 4. С. 22-25.
15. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. 2014. 431 с.
16. Шалимов М.Г., Маслов Г.П., Магай Г.С. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог. Омск: 2002. 49 с.

UDK 621.311

## MODELLING OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEMS EQUIPPED WITH SYMMETRIZING DEVICES

**Vasilij P. Zakaryukin**

Dr., Professor, Irkutsk State Transport University  
15, Chernyshevsky St., 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: zakar49@mail.ru

**Andrey V. Kryukov**

Dr., Professor, Irkutsk State Transport University  
15, Chernyshevsky St., 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: and\_kryukov@mail.ru;  
Irkutsk national research technical university  
83, Lermontov St. 83, 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**I'ya M. Avdienko**

Graduate student, Irkutsk State Transport University  
15, Chernyshevsky St., 664074, Irkutsk, Russia, e-mail: av.ila@mail.ru

**Abstract.** Single-phase traction loadings of alternating current railroad cause essential asymmetry in the feeding three-phase network. For the purpose of her reduction three types of transformers connection on traction substations are used. For feeding electrical power systems with short circuit power less than 1000 MV·A such accession of traction substations doesn't give sufficient effect. Asymmetry elimination can be carried out on the basis of symmetrizing transformers, however calculation methods of modes of traction power supply system with such transformers are practically absent.

In article modeling of traction power supply system equipped with the symmetrizing devices on the basis of methods developed in Irkutsk State Transport University are considered. Using efficiency of symmetrizing Scott's transformers, B.M. Borodulin, also the device on basis of Shtaynmets's scheme is analyzed. The positive effect of the symmetrizing devices depends on a ratio of shoulders loadings, that is on a power consumption by trains and graphics of their movement. The greatest effect takes place at the commensurable amount of train service with an identical current profile on both sides from substation with the symmetrizing transformer. For realization of such situation when modeling idealized current profiles of trains and the schedule were used. Computer modeling results on program Fazonord basis testifies to rather high efficiency of symmetrizing devices using. Essential decrease in substations' voltage asymmetry in comparison with traditional traction power supply system of 27.5 kV takes place.

**Keywords:** railroad power supply system, symmetrizing transformers, imitating modeling in phase coordinates.

### References

1. Bardushko V.D., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Principy postroeniya sistem `elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Principles of railway power supply system's creation]. Moscow: Heating engineer, 2014. 166 p.
2. Borodulin B. M. Simmetrirovaniye tokov i napryazhenij na dejstvuyuschih tyagovyh podstanciyah peremennogo toka [Balancing of currents and voltage on the operating traction substations of alternating current] // Railway Research Institute Transactions. 2003. No. 2. Pp.

- 14 - 17.
3. Vorfolomeev G.N. Shema Skotta: istoriya i perspektivy sovershenstvovaniya (k stoletiyu sozdaniya) [Scott's scheme: history and the prospects of improvement (by century of creation)] // *Electricity*. 1994. No. 10. Pp. 74-77.
  4. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy `elektricheskikh sistem [Asymmetrical modes of electric systems]. Irkutsk. 2005. 273 p.
  5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Imitacionnoe modelirovanie sistem tyagovogo `elektrosnabzheniya, osnashennykh simmetriruyuschimi ustrojstvami [Imitating modeling of traction power supply systems equipped with the symmetrizing devices] // *Transport of the Pacific Rim* No. 2 (4). 2015. Pp. 11-17.
  6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Matematicheskie modeli simmetriruyuschih transformatorov [Mathematical models of the symmetrizing transformers] // *Information and mathematical technologies in science and management. Part I*. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. Pp. 121-128.
  7. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. Modelirovanie sistem tyagovogo `elektrosnabzheniya s simmetriruyuschimi transformatorami [Modeling of traction power supply systems with the symmetrizing transformers] // *Transport infrastructure of the Siberian region*. Irkutsk, 2015. T.1. Pp. 599-604.
  8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdiyenko I.M., Ustranenie nesimmetrii v `elektricheskikh setyah, pitayuschih tyagovye podstancii zheleznyh dorog [Elimination of asymmetry in the electric networks feeding railroad traction substations] // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. No. 1(49). 2016. Pp. 189-195.
  9. Zakaryukin V.P., A.V., Ivanova E.S., Kryukov A.V. Analiz shem simmetrirovaniya tyagovykh nagruzok zheleznyh dorog peremennogo toka [Analysis of balancing schemes of alternating current traction loadings] // *System. Methods. Technologies*. No. 4(20). 2013. Pp. 68-83.
  10. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intellektual'nye tehnologii upravleniya kachestvom `elektro`energii [Intellectual technologies of electric power quality management]. Irkutsk, 2015. 218 p.
  11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Upravlenie kachestvom `elektro`energii v sistemah `elektrosnabzheniya zheleznyh dorog [Quality management of the electric power in railroad power supply systems]. Irkutsk, 2015, 180 p.
  12. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Metody sovместного modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego `elektrosnabzheniya zheleznyh dorog peremennogo toka [Methods of joint modeling of alternating current railroad traction systems and external power supply systems]. Irkutsk, 2011. 170 p.
  13. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Abramov N.A. Upravlenie sistemami tyagovogo `elektrosnabzheniya zheleznyh dorog [Management of railroad traction power supply systems] // *Management of big systems*. Is. 29. M., 2010. P. 201-213.
  14. Mamoshin R. R., Borodulin B. M., Zelvyansky A.Ya., Titov A.F. Transformatory tyagovykh podstancij s povyshennym simmetriruyuschim `effektom [Transformers of traction substations with the increased symmetrizing effect] // *Vestnik of the Railway Research Institute*. 1989. No. 4. Pp. 22-25.
  15. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. `Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog [Power supply of the railroads]. Yekaterinburg. 2014. 431 p.
  16. Shalimov M.G., Maslov G.P., Magay G.S. Sovremennoe sostoyanie i puti sovershenstvovaniya sistem `elektrosnabzheniya `elektricheskikh zheleznyh dorog [Current state and ways of improvement of railroad power supply systems]. Omsk: 2002. 49 p.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЫ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

**Иванова Ирина Юрьевна**

к.э.н., зав. лабораторией энергоснабжения децентрализованных потребителей,  
e-mail: [nord@isem.irk.ru](mailto:nord@isem.irk.ru)

**Иванов Роман Андреевич**

к.т.н., научный сотрудник лаборатории «Информационные технологии»,  
e-mail: [crowndriver@gmail.com](mailto:crowndriver@gmail.com)

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук, 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

**Аннотация.** В статье показаны возможности средств геовизуализации при аналитических исследованиях для идентификации размещения энергоисточников и прохождения трасс линий электропередачи. Объектом визуализации является энергетическая инфраструктура центральной экологической зоны Байкальской природной территории. Представлены общий вид и подробный фрагмент разработанной информационной системы энергетических объектов для одного района территории особого природопользования. Приведены примеры отображения сводной информации по котельным территории и визуального представления результатов расчетов – выбросов в атмосферу загрязняющих веществ при сжигании угля в котельных.

**Ключевые слова:** геосервисы, геовизуализация, котельные, электросетевые объекты, информационная система, антропогенное воздействие

**Введение.** В соответствии с законом «Об охране озера Байкал» [10] территория центральной экологической зоны (ЦЭЗ) Байкальской природной территории (БПТ) имеет особый статус природопользования. В центральную экологическую зону частично или полностью включены три района Иркутской области (Ольхонский, Иркутский и Слюдянский) и четыре – Республики Бурятия (Кабанский, Прибайкальский, Баргузинский, Северо-Байкальский с г. Северобайкальск).

С целью научного обоснования вариантов экологически чистого энерго-, топливоснабжения потребителей данной территории составлен реестр энергетических предприятий, относящихся к виду экономической деятельности – производство, передача и распределение электроэнергии, газа, пара и горячей воды. На исследуемой территории к таким предприятиям относятся Байкальская ТЭЦ, крупные и мелкие котельные, как правило, обеспечивающие тепловой энергией объекты социальной инфраструктуры (школы, детские сады, больницы, администрации и пр.) и жилой фонд населения, а также электросетевые объекты и автономные источники электроснабжения.

По материалам муниципальных департаментов и соответствующих министерств правительств Иркутской области и Республики Бурятия были сопоставлены и систематизированы данные по различным типам энергоисточников, электрическим сетям и

трансформаторным подстанциям. Основной проблемой при анализе состояния энергетической инфраструктуры ЦЭЗ БПТ оказалось наличие разнородной, в некоторых случаях противоречивой, информации о теплоисточниках и электросетевых объектах.

**Использование геовизуализации.** Несколько упростить эту проблему позволило использование нового направления визуализации геопространственной информации, которое предоставляет актуальную информацию о транспортной и энергетической инфраструктуре и может применяться как на уровне аналитических исследований, так и на уровне обоснования прогнозов развития территорий.

Геовизуализация за счет применения реалистичных отображений земной поверхности (космических и аэрофотоснимков) в совокупности с трехмерной моделью Земного шара позволяет перейти на новый уровень отображения информации, и тем самым, является основанием для развития средств поддержки принятия решений [2,5].

Новый подход применяется для различных задач визуализации, в том числе и в энергетике, а развитие средств для его поддержки (геосервисов) дает возможность восприятия информации в геопространственном контексте [1]. Возможности геосервиса Google Earth были успешно использованы при оценке стоимости строительства магистрального газопровода в задаче выбора рационального варианта транспортировки иркутского газа потребителям Байкальского региона и на экспорт в Монголию и Китай [3-4].

Настоящая статья посвящена использованию возможностей геосервиса Google Earth при создании информационной системы объектов энергетики ЦЭЗ, включающей электросетевые объекты, ТЭЦ, котельные, дизельные электростанции (ДЭС), возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Границы экологических зон Байкальской природной территории были определены на основе ведомости координат точек поворота границ зон, размещенной на сайте Сибирского отделения ФГУНПП «Росгеолфонд» [6] (рис. 1).

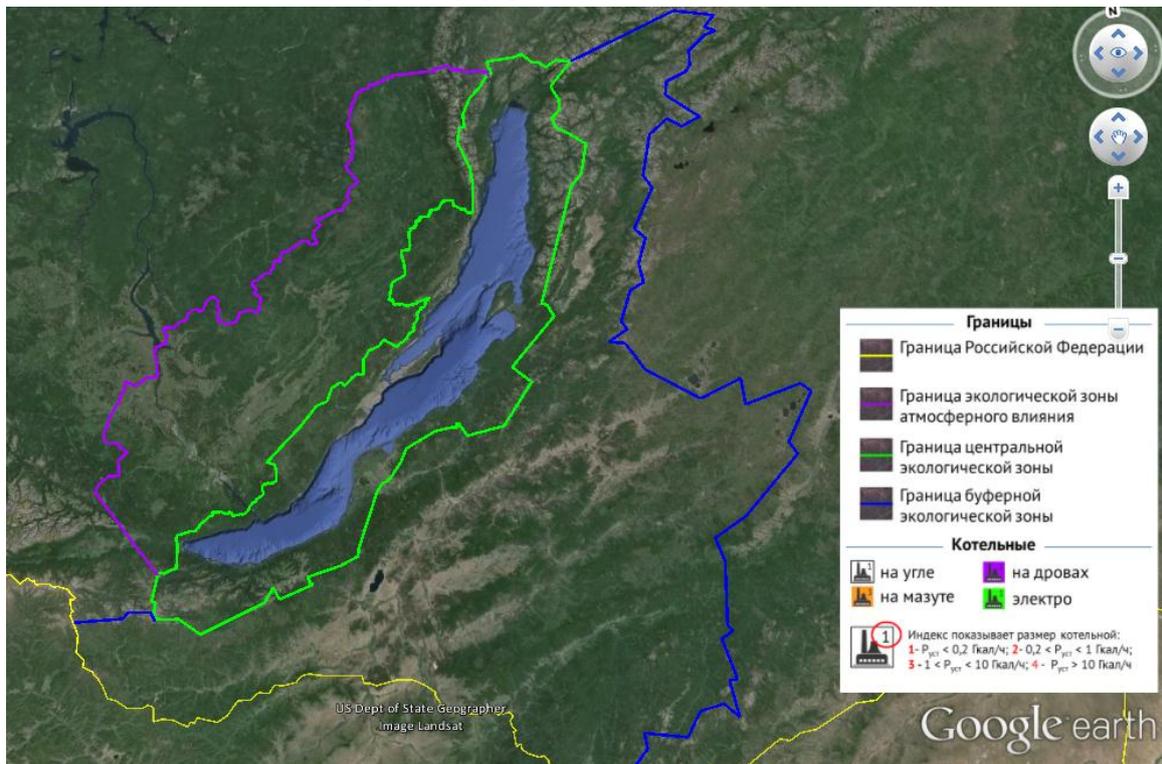
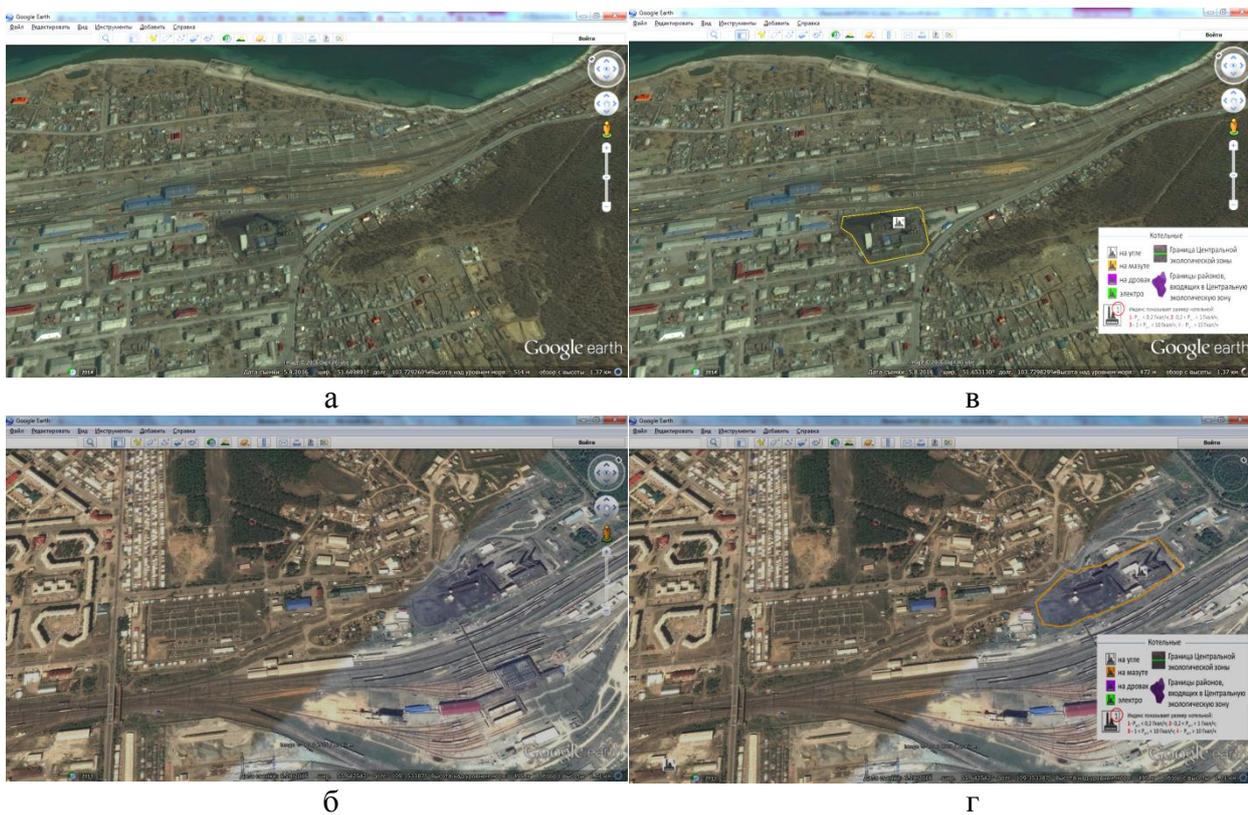


Рис. 1. Установление границ экологических зон Байкальской природной территории



**Рис. 2.** Идентификация котельных с использованием спутниковых снимков. (а) и (б) - исходные снимки, на снимках (в) и (г) котельные выделены рыжим контуром и отмечены соответствующим значком с индексом, показывающим размер котельной.

Высокое качество спутниковых снимков исследуемого региона, доступных для открытого использования, позволило идентифицировать энергетические объекты и определить их размещение на территории населенных пунктов. На рис. 2 показана идентификация месторасположения котельной, имеющей угольный склад. Кроме того, с использованием снимков были уточнены маршруты и протяженность линий электропередачи, а также расстояния доставки топлива (рис. 3).

При разработке информационной системы для более наглядного отображения предложена классификация энергообъектов: для генерирующих источников введены категории по типу, мощностному ряду, виду топлива, для электрических сетей – по классу напряжения (рис. 4). Каждой котельной соответствует значок , где индекс показывает мощностной ряд. Так, **1** соответствует установленной мощности ( $P_{уст}$ ) котельной  $< 0,2$  Гкал/ч; **2** –  $0,2 < P_{уст} < 1$  Гкал/ч; **3** -  $1 < P_{уст} < 10$  Гкал/ч; **4** –  $P_{уст} > 10$  Гкал/ч. Кроме того, введена цветовая дифференциация по виду топлива, так, белый значок определяет котельную на угле, оранжевый - на мазуте, фиолетовый – на дровах и зеленый – электростанцию.

Идентично введена градация дизельных электростанций. По мощностному ряду выделено две категории: **1** –  $P_{уст} < 1$  МВт, **2** –  $1 < P_{уст} < 10$  МВт, по типу использования отражены резервные и автономные ДЭС.

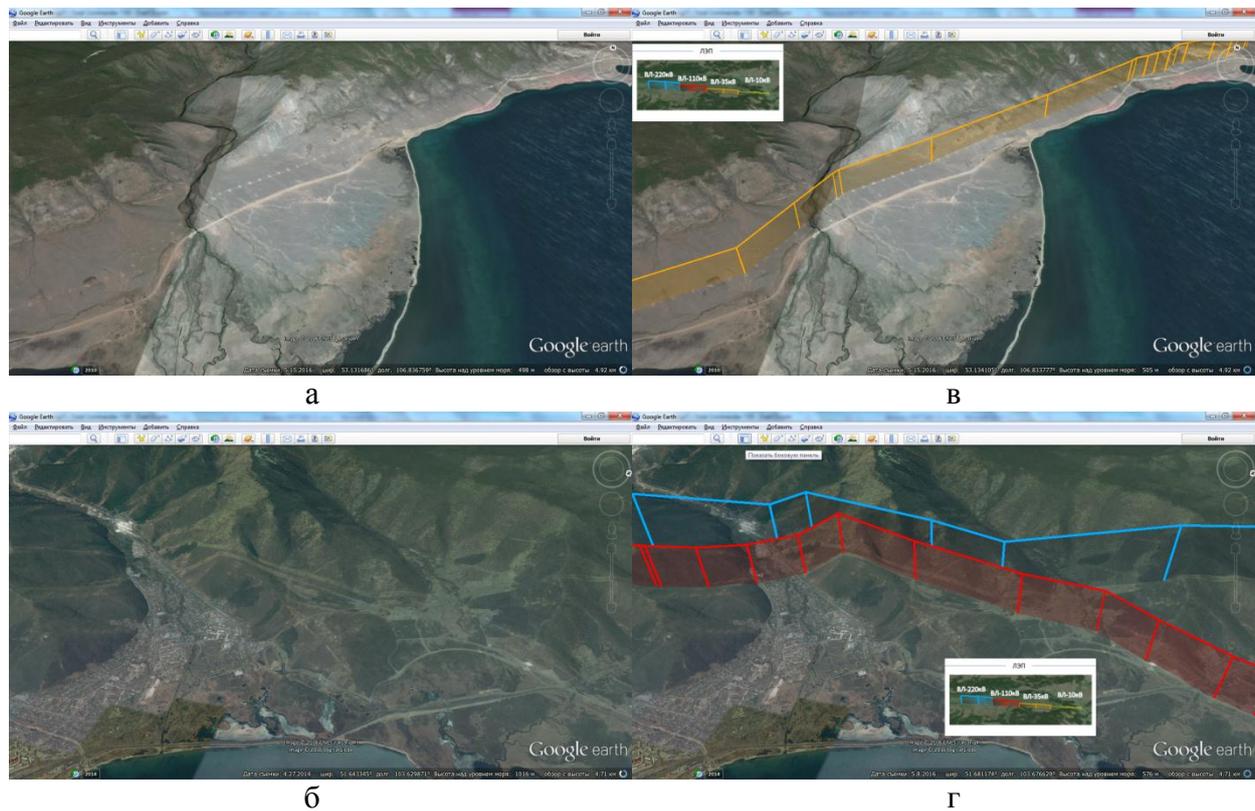


Рис. 3. Идентификация линии электропередачи с использованием спутниковых снимков. (а) и (б) – исходные снимки, на (в) и (г) отмечены ЛЭП, соответствующего класса напряжения.



Рис. 4. Классификация объектов энергетики ЦЭЗ информационной системы

Введены определенные значки, соответствующие типу возобновляемого энергоисточника: фотоэлектрической станции (ФЭС), систем солнечного теплоснабжения (ССТ), малой гидроэлектростанции (МГЭС), ветроэлектростанции (ВЭС).

Линии электропередачи представлены в виде наборов отрезков, оторванных от поверхности Земли. Такой способ отображения позволяет наглядно отобразить ЛЭП в

трехмерном пространстве. Определенный цвет той или иной ЛЭП соответствует классу ее напряжения (220 кВ – голубой, 110 кВ – красный, 35 кВ – оранжевый и 10 кВ - желтый).

Общий вид информационной системы энергетической инфраструктуры центральной экологической зоны приведен на рис. 5, более подробный фрагмент Ольхонского района – на рис. 6. Описанные значки сведены в легенду и представлены крупно на рис. 6.

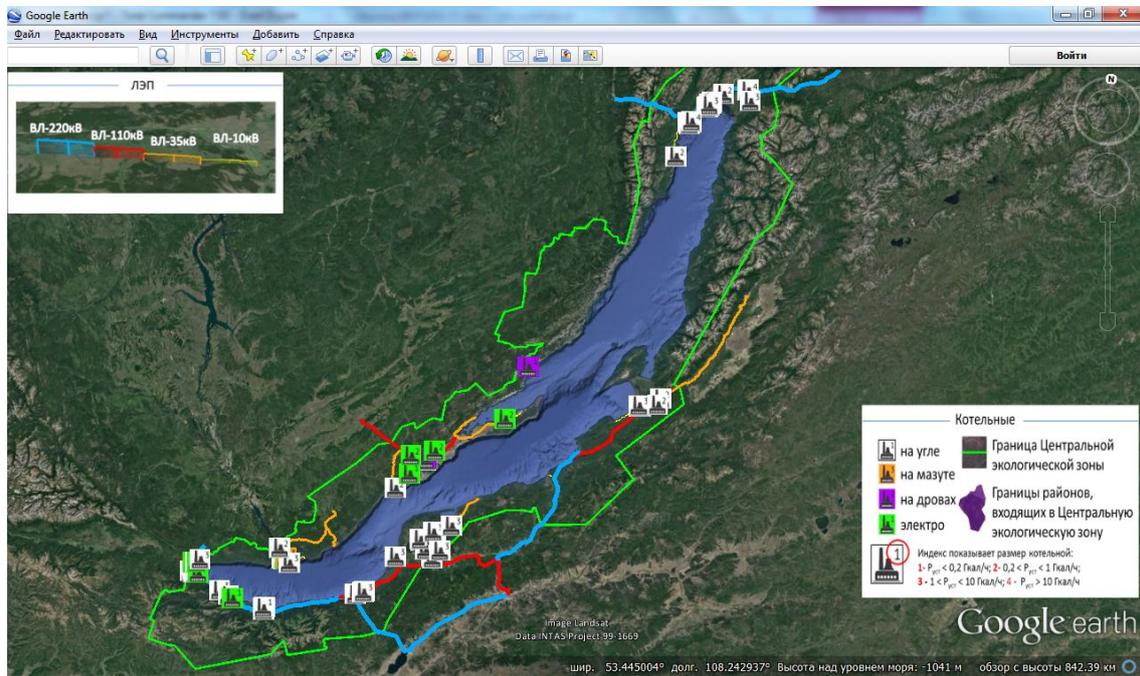


Рис. 5. Общий вид информационной системы энергетической инфраструктуры центральной экологической зоны

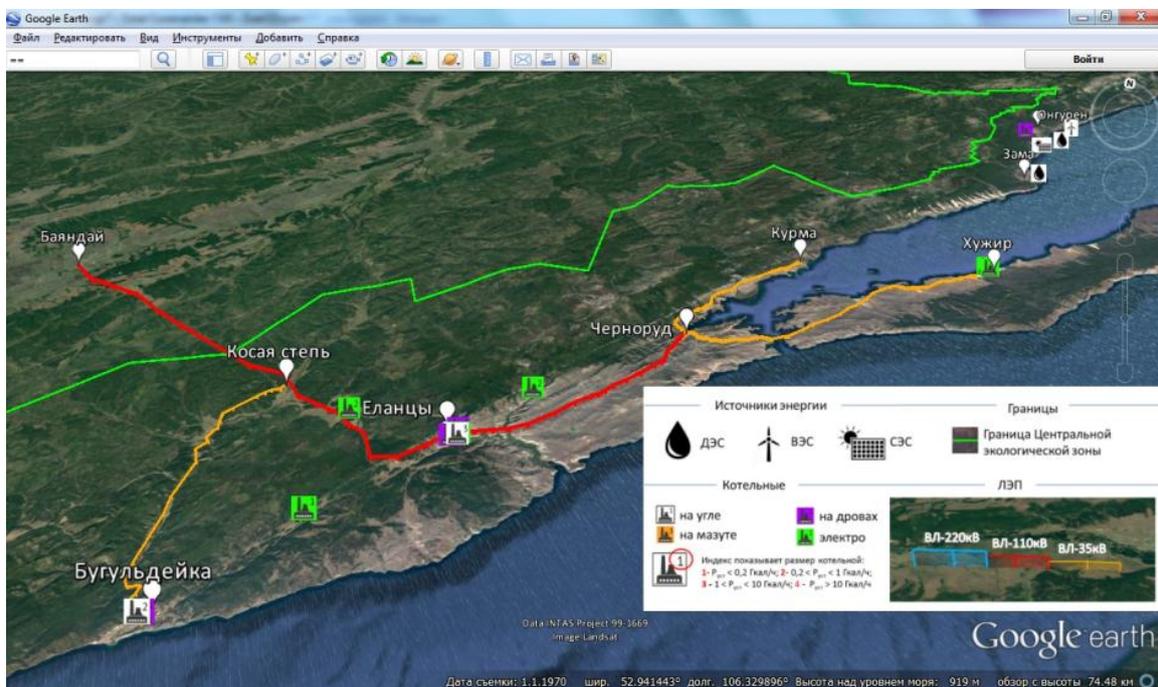


Рис. 6. Фрагмент информационной системы Ольхонского района

Цифровые данные, отражающие технико-экономические показатели энергоисточников, величину электрической и тепловой нагрузки, энергопотребление могут быть представлены отдельными слоями с необходимой подробностью [9, 11].

**Результаты исследования.** Выполненные аналитические исследования с использованием методов геовизуализации позволили оценить состояние и обеспеченность энергетической инфраструктурой потребителей центральной экологической зоны Байкальской природной территории. Подробное описание энергетической инфраструктуры по районам центральной экологической зоны приведено в [7].

Основная часть потребителей в этой зоне электроэнергией обеспечивается централизованно от Иркутской и Бурятской энергосистем. Лишь некоторые мелкие населенные пункты, турбазы, метеостанции, расположенные в труднодоступных местах на побережье северной части ЦЭЗ, снабжаются электроэнергией от автономных дизельных электростанций. Несмотря на наличие значительного потенциала возобновляемых природных энергоресурсов (ветро-, гелио, гидропотенциала малых водотоков) [8], источники энергии на этих видах ресурсов в коммунальной энергетике ЦЭЗ до недавнего времени были представлены лишь небольшими объектами. В последние годы наметилась тенденция более широкого применения этого вида энергоисточников на строящихся туристических базах на побережье озера, в основном, солнечных коллекторов для горячего водоснабжения, подогрева бассейнов и пр., а также фотоэлектрических модулей для автономного и резервного электроснабжения.

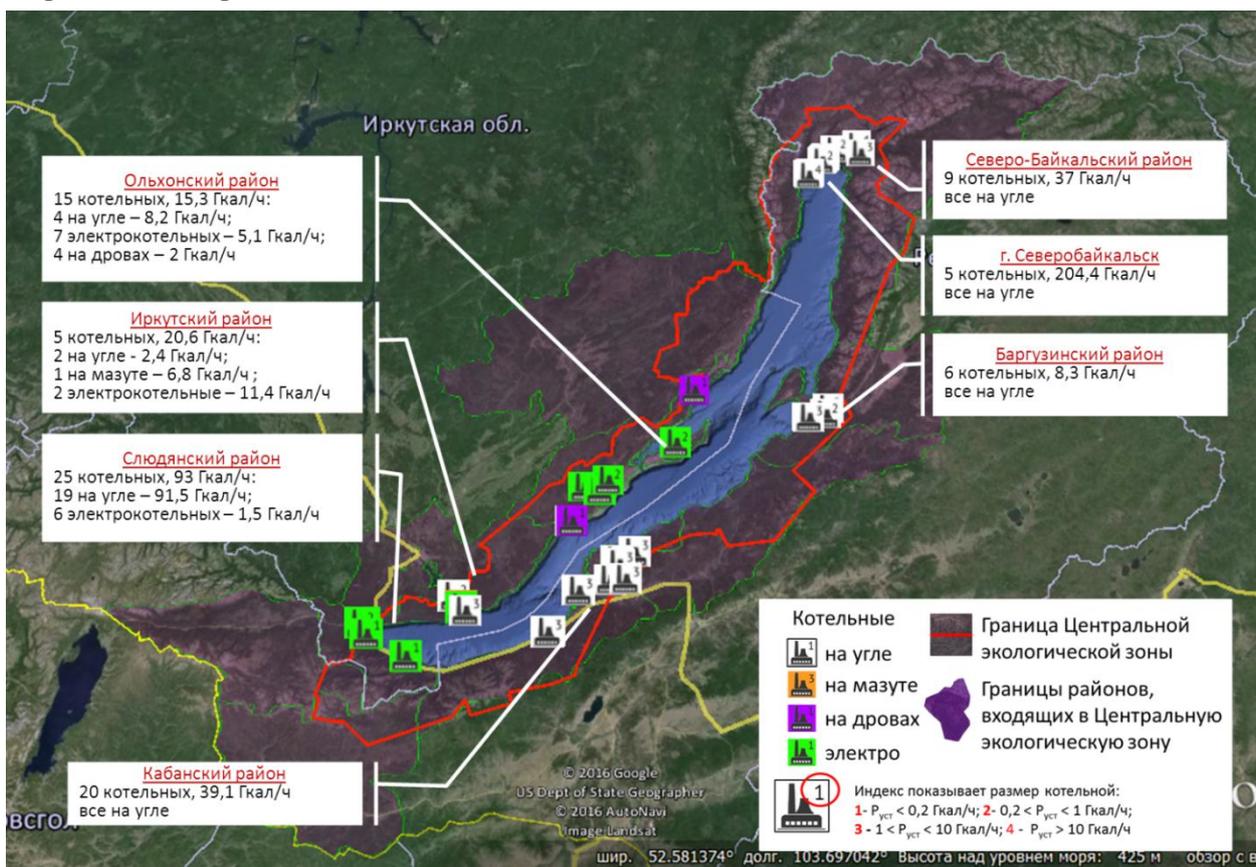


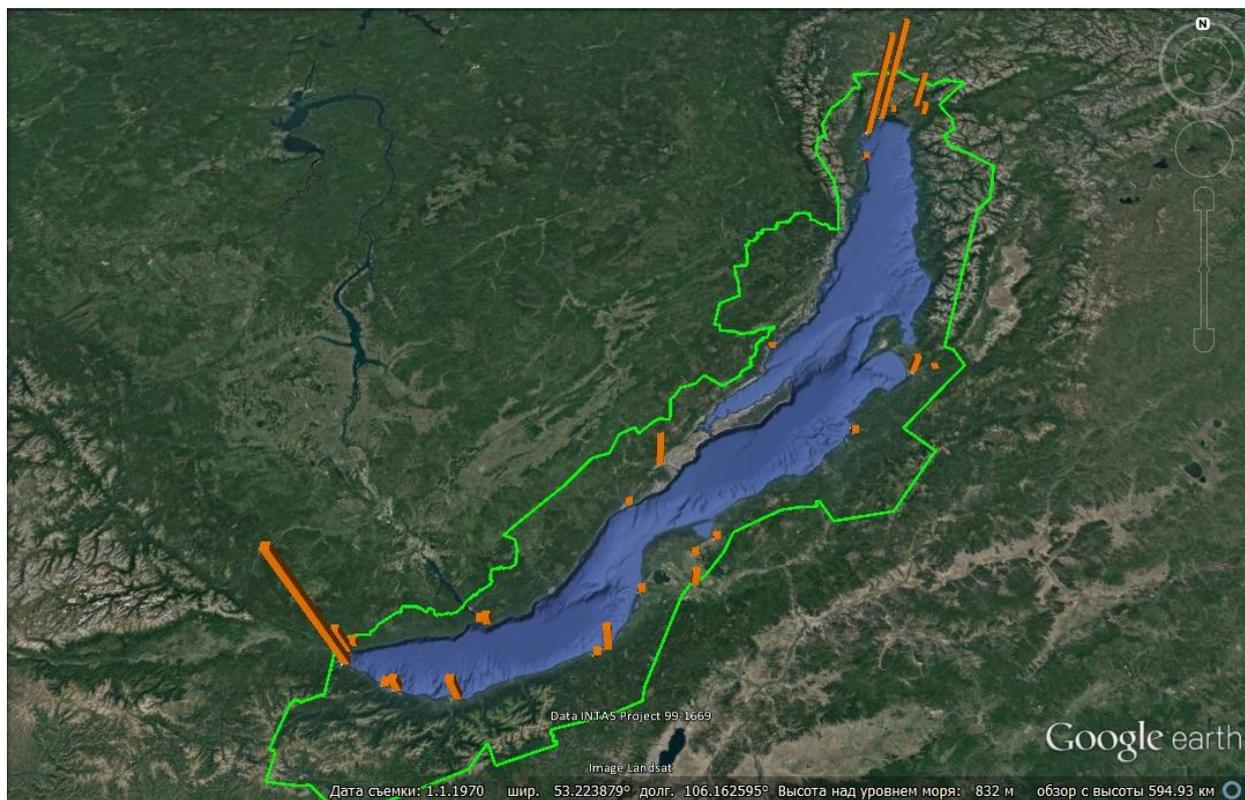
Рис. 7. Сводная информация по котельным ЦЭЗ

Среди объектов энергетической инфраструктуры наибольшее антропогенное воздействие на природную среду центральной экологической зоны оказывают котельные и ТЭЦ. В целом в границах ЦЭЗ функционируют более 100 котельных разной мощности. Однако в реестр для настоящей работы включены только 85 котельных муниципальной принадлежности. Информация по мелким автономным источникам тепла отсутствует.

Суммарная установленная мощность муниципальных котельных составляет 417,7 Гкал/ч, из них 65 котельных (мощностью 390,9 Гкал/ч) в качестве топлива используют уголь, сводная информация по ним представлена на рис. 7.

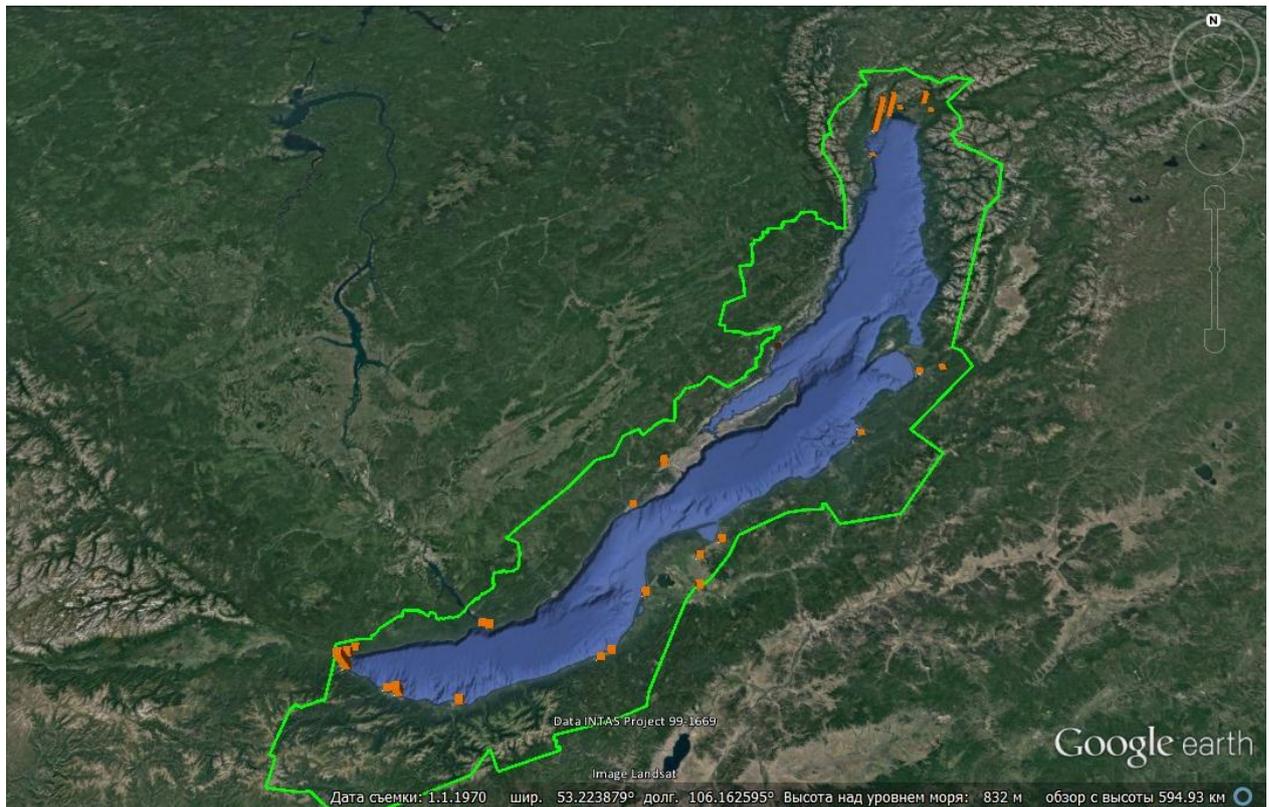
Систематизация информации по котельным дала возможность выполнить расчеты выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и провести ранжирование территории ЦЭЗ как по объектам (источникам), так и по населенным пунктам и суммарно по котловинам озера Байкал.

Экологическое ранжирование территории центральной экологической зоны показало, что основной выброс в атмосферу от объектов энергетики сосредоточен в южной и северной котловинах оз. Байкал. Наглядно этот вывод представлен на рис. 8 и 9 по территориальному распределению выбросов твердых веществ и оксидов серы соответственно.



**Рис. 8.** Расчетный выброс твердых веществ в атмосферу от энергообъектов ЦЭЗ

**Заключение.** Использование визуализации при решении геопространственных задач может служить средством поддержки принятия решений при исследованиях аналитического характера для оценки текущего состояния энергетической инфраструктуры. Возможности геосервисов позволяют не только уточнить места размещения энергообъектов и прохождения трасс электрических сетей, но и наглядно отобразить их на реальной территории, используя методы классификации и группировки, для улучшения восприятия. Кроме того, геовизуализация может достаточно эффективно применяться и для представления как промежуточных, так и итоговых результатов исследований. При этом использование многослойности информации дает возможность без дополнительных затрат отображать различные слои по сформированному запросу.



**Рис. 9.** Расчетный выброс оксидов серы в атмосферу от энергообъектов ЦЭС

Описанные результаты отражены в разделе по текущему состоянию энергетической инфраструктуры центральной экологической зоны Байкальской природной территории научно-исследовательской работы по теме «Научное обоснование экологической допустимости размещения объектов хозяйственной и иных видов деятельности в центральной экологической зоне Байкальской природной территории» по реализации федеральной целевой программы «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории».

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках регионального проекта №14-48-04139-р\_сибирь\_a, а также грантов РФФИ №14-07-0116а, №15-07-01284а, №16-07-00474а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремченко Е., Тикунов В., Чи-Гон С. Противоречивость и несогласованность пространственно-временных данных: возможность решения проблемы в геоинформационной среде // Геодезия и картография. 2013. № 4. С. 41–47.
2. Иванов Р.А. Методика 3D–визуализации для поддержки принятия решений в энергетических исследованиях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. №1(37). С. 116-121.
3. Ижбулдин А.К., Иванов Р.А. Применение геосервисов для задач сравнительной экспресс-оценки маршрутов нефтегазопроводов // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. - 2015. - № 12. с. 21-28
4. Ижбулдин А.К., Платонов Л.А. Анализ маршрутов поставок российского трубопроводного газа в Китай. Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие

- и управление // Сб. статей всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление», 1-3 сентября 2015 г., Иркутск, Россия. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. 591 с. ISBN 978-5-93908-138-2. С 156-161.
5. Массель Л.В., Иванов Р.А., Массель А.Г. Моделирование этапов принятия решений на основе сетецентрического подхода / Вестник ИрГТУ . №10 (81). 2013. С. 16-22.
  6. Официальный сайт Сибирского отделения ФГУНПП «Росгеолфонд» [Электронный ресурс] - <http://www.geol.irk.ru/> (дата обращения 23.09.2016).
  7. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Майсюк Е.П., Тугузова Т.Ф., Иванов Р.А. Энергетическая инфраструктура центральной экологической зоны: воздействие на природную среду и пути его снижения // География и природные ресурсы. 2016. №5. С.45-48.
  8. Санеев Б. Г., Иванова И. Ю., Тугузова Т. Ф., Халгаева Н. А. Возобновляемая энергетика как одно из направлений снижения антропогенной нагрузки в центральной экологической зоне Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2016. №3. С.86-90.
  9. Сайт компании DATA+ [http://www.dataplus.ru/services/geo\\_database\\_design/](http://www.dataplus.ru/services/geo_database_design/)
  10. Федеральный закон от 1.05.1999 г. № 94-ФЗ «Об охране озера Байкал» [Электронный ресурс] - <http://base.garant.ru/2157025/> (дата обращения 23.09.2016).
  11. Virtual story in cyberspace: valley of geysers, kamchatka: Unesco natural heritage site in cyberworld / A. Leonov, A. Serebrov, M. Anikushkin et al. // 10th International Conference on Cyberworlds, CW 2010 Proceedings. sponsors: Nanyang Technological University, IEEE Computer Society, IEEE, ACM SIGGRAPH, Media Development Authority (MDA). — KAMCHATKA, 2010. Pp. 247–253.
- 

**UDK 004:82, 003:62**

**THE USE OF GEOVISUALIZATION IN THE ANALYSIS OF ENERGY  
INFRASTRUCTURE PLACEMENT IN THE CENTRAL ECOLOGICAL ZONE OF THE  
BAIKAL NATURAL TERRITORY**

**Irina Yu. Ivanova**

Ph.D., Head of the laboratory “Energy supply for distributed consumers”,

e-mail: [nord@isem.irk.ru](mailto:nord@isem.irk.ru)

**Roman A. Ivanov**

Ph.D., Researcher of the laboratory «Information technology in the energy sector»,

e-mail: [crowndriver@gmail.com](mailto:crowndriver@gmail.com)

Melentiev energy systems institute Siberian branch of the Russian academy of sciences  
664033, Irkutsk, Lermontov St., 130

**Abstract** The article shows the possibilities of geovisualization tool in analytical investigations to identify the placement of energy sources and transmission power line routes. The object of the visualization is the energy infrastructure of the central ecological zone of the Baikal natural territory. General view of and part of of one district energy facilities of special wildlife management area information system is presented. Examples of summary information on the boiler on the Baikal natural

territory and the visual representation of the results of calculations - emissions of pollutants from coal combustion in the boiler are given in the article.

**Keywords:** geoservices, geovisualization, boilers, electric grid facilities, anthropogenic impact

### References

1. Eremchenko E., Tikunov, Chi-Gon C. Protivorechivost' i nesoglasovannost' prostranstvennovremennyh dannyh: vozmozhnost' reshenija problemy v geoinformacionnoj srede [Contradictory and inconsistent the space-data: the ability to solve the problem in the medium-term geo-information] // Geodesy and Cartography. 2013. № 4. Pp. 41-47. (in Russian)
2. Ivanov R. Metodika 3D–vizualizacii dlja podderzhki prinjatija reshenij v jenergeticheskix issledovanijah [Methods 3D-visualization for decision-making support for energy research] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2013. №1 (37). Pp. 116-121. (in Russian)
3. Izhbuldin A., Ivanov R. The use of geo-services for task comparative rapid assessment of oil and gas pipeline routes // Problems of Economics and Management of oil and gas complex. - 2015. № 12. Pp. 21-28. (in Russian)
4. Izhbuldin A.K., Platonov L.A. Analiz marshrutov postavok rossijskogo tubo-pro-vodnogo gaza v Kitaj. [Analysis of the supply routes of Russian gas in pipeline, the water in China.]/Russian Energy in the XXI century. Innovative development and management // Coll. Articles All-Russian Conference "Russian Energy in the XXI ve-kyo. Innovative development and management ", September 1-3, 2015 Irkutsk, Russia. - Irkutsk: ESI SB RAS, 2015. 591 p. - ISBN 978-5-93908-138-2. With 156-161.5.
5. Massel L., Ivanov R., Massel A. Modeling stages of decision-making re-based network-centric approach / Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2013. №10 (81). Pp. 16-22. (in Russian)
6. The official website of the Siberian Branch FGUNPP "Rosgeolfond" [Electronic resource] <http://www.geol.irk.ru/> (reference date 09/23/2016).
7. Saneev B., Ivanova I., Maisyuk E., Tuguzova T., Ivanov R. Jenergeticheskaja infrastruktura central'noj jekologicheskoy zony: vozdejstvie na prirodnuju sredu i puti ego snizhenija [Energy infrastructure is the central ecological zone: the impact on the environment and ways to reduce it]// Geography and natural resources. 2016. №5. Pp.45-48. (in Russian)
8. Saneev B., Ivanova I., Tuguzova T., Halgaeva N. Vozobnovljaemaja jenergetika kak odno iz napravlenij snizhenija antropogennoj nagruzki v central'noj jekologicheskoy zone Bajkal'skoj prirodnoj territorii [Renewable Energy as one of the ways to reduce the anthropogenic load in the central ecological zone of the Baikal natural territory] // Geography and natural resource 2016. №3. Pp.86-90. (in Russian)
9. DATA + [Electronic resource] [http://www.dataplus.ru/services/geo\\_database\\_design/](http://www.dataplus.ru/services/geo_database_design/)
10. Federal Law of 05.01.1999, № 94-FZ "On the Protection of Lake Baikal" [Electronic resource] <http://base.garant.ru/2157025/> (reference date 23/09/2016).
11. Virtual story in cyberspace: valley of geysers, kamchatka: Unesco natural heritage site in cyberworld / A. Leonov, A. Serebrov, M. Anikushkin et al. // 10th International Conference on Cyberworlds, CW 2010 Proceedings. sponsors: Nanyang Technological University, IEEE Computer Society, IEEE, ACM SIGGRAPH, Media Development Authority (MDA. — KAMCHATKA, 2010. Pp. 247–253.

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ МНОГОМЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**Марухина Ольга Владимировна**

К.т.н., доцент, e-mail: [marukhina@tpu.ru](mailto:marukhina@tpu.ru)

**Берестнева Ольга Григорьевна**

Д.т.н., профессор, e-mail: [ogb6@yandex.ru](mailto:ogb6@yandex.ru)

**Мокина Елена Евгеньевна**

Ст. преподаватель, e-mail: [Alisandra@tpu.ru](mailto:Alisandra@tpu.ru)

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

**Аннотация.** Статья посвящена оценке биологического системного состояния с помощью интегрированных индикаторов, а также методов обработки изображений на примере решения проблемы идентификации психологических и физиологических характеристик пациентов с различными формами астмы.

Описана разработка программного продукта на основе пиктографиков «Лица Чернова». Эта программа предназначена для формирования графических образов, отображающих функциональное состояние человека, и, в частности, динамику изменения состояния пациентов в процессе лечения.

**Ключевые слова:** анализ медицинских данных, базы знаний, методов обработки изображений, медицинская экспертная система.

**Введение.** Воздействие интерактивной компьютерной графики (ИКГ) привело к возникновению нового направления в проблематике искусственного интеллекта, названного когнитивной (т.е. способствующей познанию) компьютерной графикой. Когнитивная графика – это совокупность приемов и методов образного представления условий задачи, которое позволяет либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения [5]. Отдельное направление когнитивная графика образует в медицине. Визуализация текущего состояния объекта и характерных особенностей позволяет обеспечить непрерывный контроль над состоянием групп лиц либо отдельного человека.

Настоящая работа посвящена вопросам выявления психологических и физиологических особенностей больных с различными формами бронхиальной астмы с помощью методов визуализации многомерных данных.

В ходе длительного динамического наблюдения за больными, анализа жизненных событий, анамнеза жизни К.Г. Языковым и Е.В. Немеровым [7] была выявлена группа пациентов с высокой чувствительностью к психотравмирующим жизненным ситуациям. В 2009-2012 году ими получены и опубликованы результаты, подтверждающие данную гипотезу. Часть результатов получена с помощью применения методов визуализации многомерных данных, которые и представлены в данной статье.

Современные компьютерные технологии используют широкий спектр методов визуализации информации. Методы визуализации позволяют исследователю одним взглядом

обнаружить особенности, выявить закономерности и аномалии в больших объемах информации.

**Методы интегральной оценки состояния биосистем.** На сегодняшний день существует достаточно большое количество подходов к формированию интегральных оценок состояния биосистем. В работе использован подход, основанный на информационно-энтропийном методе, в модификации предложенной О.Г. Берестневой и Я.С. Пеккером [2].

Информационно-энтропийный метод представляет собой пример так называемого внешнего описания состояния больших систем. Известно, что энтропия живых систем – мера неопределенности распределения состояний биологических систем. По мнению некоторых авторов, увеличению энтропии в процессе перехода от нормы к патологии противостоят механизмы адаптации. Общий адаптационный синдром обеспечивает мобилизацию функциональных резервов организма. Происходят активизация и лабиализация функциональных систем, что ведет к снижению энтропии. Перенапряжение и истощение регуляторных механизмов сопровождается увеличением энтропии, что, в частности, проявляется в уменьшении согласованности элементов функциональной системы, ухудшением их синхронизации.

Для оценки степени отклонения состояния организма от уровня нормального функционирования используется критерий на основе информационной меры Кульбака, а именно, рассмотрение информационной меры Кульбака как меры предпочтительности поведения биообъекта [8]:

$$I_{адант} = \sum_{j=1}^n P_0(x_j) \ln \frac{P_0(x_j)}{P_1(x_j)}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество «существенных» признаков.

$P_0(x_j)$  – вероятность, характеризующая «предпочтительную» вероятность состояния объекта, т.е. случай, когда отклонения  $j$ -ой переменной от физиологической нормы равно 0.

Вероятность  $P_1(x_j)$  – апостериорная вероятность – вычисляется по следующей формуле:

$$P_1(x_j) = P(|X - a| < \delta) = 2\Phi\left(\frac{\delta}{\sigma}\right) - 1. \quad (2)$$

В выражении (1) вероятность  $P_0(x_j) = 1$ , поскольку, в качестве «предпочтительного» состояния объекта мы приняли состояние, при котором отклонение  $\delta = 0$  (для нормального распределения), следовательно:

$$I_{адант} = \sum_{j=1}^n \ln \frac{1}{P_1(x_j)}. \quad (3)$$

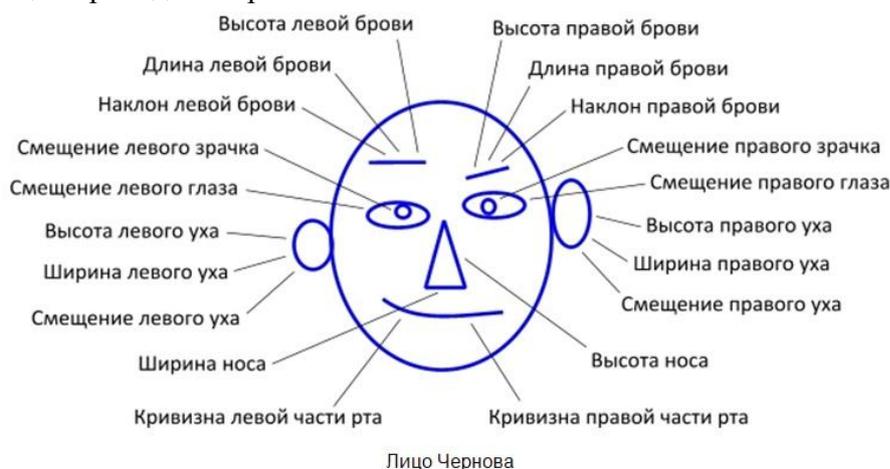
Данный критерий позволяет оценить степень отклонения текущего состояния объекта от «предпочтительного».

Изложенный выше математический аппарат был успешно применен ранее Берестневой О.Г., Пеккером Я.С., Ротовым А.В., Гергет О.М. и некоторыми другими исследователями для решения нескольких конкретных задач: оценки состояния адаптированности нефтяников и лесозаготовителей в условиях вахты [1]; оценки состояния организма на основе анализа результатов функциональных проб [4]; диагностики состояния новорожденных в раннем неонатальном периоде [3]; слежение за динамикой состояния организма человека в послеоперационном периоде [3].

**Методы визуального представления состояния объекта. Пиктографики «Лица Чернова».** Многомерные пиктографики – не очень простой, но мощный исследовательский инструмент разведочного анализа данных. Главная идея такого метода анализа основана на человеческой способности «автоматически» фиксировать сложные связи между многими переменными, если они проявляются в последовательности элементов.

Лица Чернова – это один из наиболее интересных типов пиктографиков. Herman Chernoff придумал использовать для поиска зависимостей одних статистических показателей от других (корреляций) ресурсы мозга, отвечающие за распознавание лиц.

Основная идея представления информации в «лицах Чернова» состоит в кодировании значений различных переменных в характеристиках или чертах человеческого лица [6]. Пример такого «лица» приведен на рис. 1.



**Рис. 1.** Пример изображения пиктографика «лицо Чернова»

Для каждого наблюдения рисуется отдельное «лицо». На каждом «лице» относительные значения переменных представлены как формы и размеры отдельных черт лица (например, длина и ширина носа, размер глаз, размер зрачка, угол между бровями).

Анализ информации при помощи такого способа отображения основан на способности человека интуитивно находить сходства и различия в чертах лица.

Для отображения динамики состояния объектов многие авторы предлагают использовать асимметрию, она позволяет рассматривать объекты в прогрессе.

В качестве исходной информации использовались данные клиники, в которой зарегистрированы результаты исследования 83 человек с установленным диагнозом бронхиальной астмы. 23 человека – первая группа – бронхиальная астма психогенно-индуцированная; 19 человек – вторая группа – бронхиальная астма сомато-психогенная; 29 человек – третья группа – бронхиальная астма непсихогенная, 12 человек – четвертая группа – психогенная одышка (не болеют бронхиальной астмой).

**Программная реализация. Программа CHERN.** В Институте кибернетики ТПУ с 2012 года ведутся работы по разработке программного обеспечения визуализации состояния биологических объектов на основе пиктографиков «Лица Чернова».

На первом этапе нами была разработана узкоспециализированная программа Chern, реализующая данный подход для отображения функционального состояния больных бронхиальной астмой. Однако, в нашем случае, для оценки состояния объекта «до» и «после» воздействия используется не две половины «лица», а два разных пиктографика.

Принцип работы программы Chern заключается в следующем: при сравнении параметров до и после лечения, если параметры после лечения больше, чем до лечения, на рисунке у прямых начинается отклонение вправо или вниз, а окружности вытягиваются влево и вправо (обратный принцип только у глаз и зрачков); если же меньше или равны, то изменения на рисунке наоборот. При плохом прослеживании отклонения можно воспользоваться просмотром координат точек, которые появляются при нажатии на интересующую часть рисунка. Ниже приведен пример, в котором для построения «лиц» используются 22 информативных физиологических показателя, характеризующих состояние больных бронхиальной астмой.

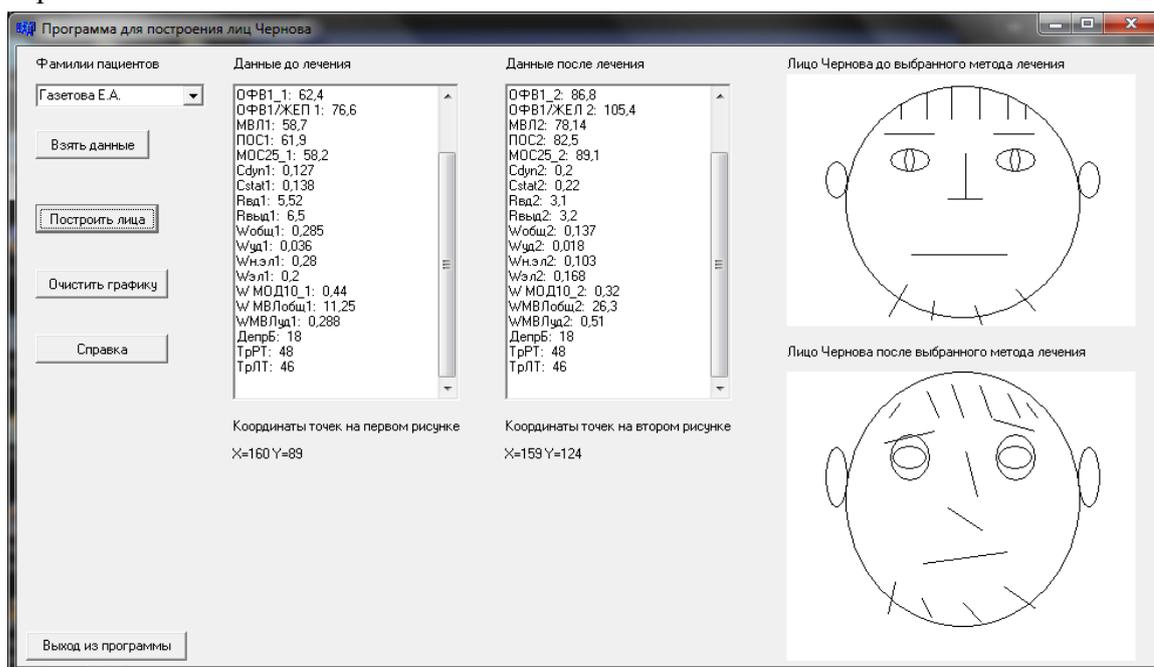


Рис. 2. Отображение состояния больного до и после лечения в виде «лиц Чернова»

Основным недостатком программы Chern является то, что она предназначена для решения конкретной прикладной задачи – оценки динамики состояния больных бронхиальной астмой.

**Заключение.** Развитием разработанного программного продукта явилось создание универсальной программы «Chernoff Faces». Данная программа предназначена для формирования графических образов, отображающих функциональное состояние человека, и, в частности, динамику изменения состояния пациентов в процессе лечения.

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения научных проектов № 15-07-08922, № 14-07-00675, № 14-06-00026*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берестнева О.Г., Карпов Г.А., Пеккер Я.С. Оценка функционального состояния беременных женщин по данным ортостатической пробы // Медико-биологические аспекты нейро-гуморальной регуляции. Вып. 3. Томск. 1994. С. 4–6.
2. Берестнева О.Г., Пеккер Я.С. Применение интегральных энтропийных критериев в анализе биотехнических систем / Томский политехнический институт. Томск. 1987. 19 с. Деп. в ВНИИ МИ 21.04.87., № 13259.

3. Берестнева О.Г., Цхай В.Ф., Пеккер Я.С. Применение интегральных критериев для оценки послеоперационного состояния при механических желтухах паразитарной природы // Медико-биологические аспекты нейро-гуморальной регуляции. Вып. 3. Томск. 1994. С. 8–9.
  4. Гергет О.М., Берестнева О.Г., Пеккер Я.С., Сваровская И.Г. Математическое моделирование состояния детей в раннем неонатальном периоде // Актуальные проблемы информатики: Сб. трудов VI Междунар. научн. конф. Ч. 1. Минск. 1998. С. 174–176.
  5. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика / Под ред. Д.А. Поспелова // М.: Наука. 1991. 187 с.
  6. Кабулов Б.Т. Метод построения лиц Чернова, ориентированный на интервальные оценки параметров // Техническая кибернетика. 1991. 250 с.
  7. Немеров Е.В., Языков К.Г. К вопросу изучения личностных свойств в психофизиологической реактивности больных бронхиальной астмой на аудиовизуальную стимуляцию // Вестник ТГПУ. 2011. В. 6 (108). С. 134-137.
  8. Пеккер Я.С., Берестнева О.Г., Ротов А.В. Моделирование процессов адаптации организма вахтовых рабочих с учетом типа функциональной конституции // Механизмы адаптации организма: Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. Томск. 1996. С. 105–107.
- 

**UDK 004**

**VISUALIZATION AND ANALYSIS OF MULTI-DIMENSIONAL  
EXPERIMENTAL DATA**

**Olga V. Marukhina**

Ph.D., Assistant Professor, National Research Tomsk Polytechnic University  
Russia, (634050, Tomsk, Lenina av. 30), e-mail: marukhina@tpu.ru

**Olga G. Berestneva**

Dr., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University  
Russia, (634050, Tomsk, Lenina av. 30), e-mail: marukhina@tpu.ru

**Elena E. Mokina**

Senior teacher, National Research Tomsk Polytechnic University  
Russia, (634050, Tomsk, Lenina av. 30), e-mail: marukhina@tpu.ru

**Abstract.** The article is devoted to evaluation of the biological systems status which based on integrated indicators, as well as imaging techniques on the example of solving the problem of identifying the psychological and physiological characteristics of patients with various forms of asthma. The development of the developed software product was the creation of a universal program «Chernoff Faces». This program is designed to generate graphics images displaying human functional state, and, in particular, the dynamics of the patient's condition during treatment.

**Keywords:** analysis of medical data, knowledge base, imaging techniques, medical expert system.

*The research was partially supported by RFBR as part of research projects  
№ 15-07-08922, № 14-07-00675, № 14-06-00026*

### References

1. Berestneva O.G., Karpov G.A., Pecker Y.S. Ocenka funkcional'nogo sostoyaniya beremennyh zhenshchin po dannym ortostatischej proby [Evaluation of the functional condition of pregnant women according to the orthostatic test] // Medical and biological aspects of neuro-humoral regulation. Vol. 3. Tomsk. 1994. Pp. 4-6. ( in Russian)
2. Berestneva O.G., Pecker Y.S. Primenenie integral'nyh ehntropijnyh kriteriev v analize biotekhnicheskikh sistem [Application of integral entropy criteria in the analysis of biotechnical systems] / Tomsk Polytechnic Intstitute. Tomsk, 1987. 19 p. Dep. MI Institute in 21.04.87., № 13259. ( in Russian)
3. Berestneva O.G., Tskhai V.F., Pecker Y.S. Primenenie integral'nyh kriteriev dlya ocenki posleoperacionnogo sostoyaniya pri mekhanicheskikh zheltuhah parazitarnoj prirody [Integrated criteria using for the assessment of post-operative state in obstructive jaundice parasitic nature] // Medical and biological aspects of neuro-humoral regulation. Vol. 3. Tomsk. 1994. Pp. 8-9. ( in Russian)
4. Gerget O.M., Berestneva O.G., Pecker Y.S., Svarovskaya I.G. Matematicheskoe modelirovanie sostoyaniya detej v rannem neonatal'nom periode [Mathematical modeling of the state of children in the early neonatal period] // Actual problems of informatics: Coll. works of VI Intern. Scien. Conf. Part 1. Minsk. 1998. Pp. 174-176. ( in Russian)
5. Zenkin A.A. Kognitivnaya komp'yuternaya grafika [Cognitive Computer Graphics] / Ed. YES. Pospelov // M.: Science. 1991. Pp.187. ( in Russian)
6. Kaboulov B.T. Metod postroeniya lic CHernova, orientirovannyj na interval'nye ocenki parametrov [The method of constructing Chernova people-oriented interval estimates of parameters] // Technical Cybernetics. 1991. 250 p. ( in Russian)
7. Nemerov E.V., Yasikov K.G. K voprosu izucheniya lichnostnyh svojstv v psihofiziologicheskoj reaktivnosti bol'nyh bronhial'noj astmoj na audiovizual'nyu stimulyaciyu [On the issue of studying personality traits psychophysiological reactivity in patients with bronchial asthma in the audiovisual stimulation] // Bulletin of Tomsk State Pedagogical University. 2011. V. 6 (108). Pp. 134-137. ( in Russian)
8. Pecker Y.S., Berestneva O.G., Rotov A.V. Modelirovanie processov adaptacii organizma vahtovyh rabochih s uchetom tipa funkcional'noj konstitucii [Adaptation processes modelling of shift workers bodies according to the type of functional constitution] // Mechanisms of adaptation: Proceedings of All Russian scientific-practical. Conference. Tomsk. 1996. Pp. 105-107. ( in Russian)

УДК 004.9

**РАЗРАБОТКА ВЕБ-ГИС НА ОСНОВЕ СЕРВИСОВ ОБРАБОТКИ И  
ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

**Титов Александр Георгиевич**

Научный сотрудник, e-mail: [titov@scert.ru](mailto:titov@scert.ru)

**Окладников Игорь Георгиевич**

К.т.н., старший научный сотрудник, e-mail: [oig@scert.ru](mailto:oig@scert.ru)

**Гордов Евгений Петрович**

Д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, e-mail: [gordov@scert.ru](mailto:gordov@scert.ru)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055,  
г. Томск, Академический пр.,10/3,

Томский филиал Института вычислительных технологий СО РАН, 634055, г. Томск,  
пр. Академический, 10/4

**Аннотация.** Наборы пространственных геофизических данных широко используются при выполнении научных исследований. В силу ряда объективных факторов (изначальная разнородность наборов данных, значительный объем, географическая распределенность), разработка сервисов доступа, обработки и визуализации геоданных, а также соответствующих клиентских приложений не является тривиальной задачей. В статье представлена рабочая версия сервис-ориентированной Веб-ГИС для анализа и прогнозирования региональных климатических изменений. Она базируется на современных OGC/ISO стандартах сервисов пространственных данных и метаданных, а также апробированном программном обеспечении с открытым кодом. Реализованная распределенная архитектура позволяет оперативно добавлять новые удаленные вычислительные мощности и системы хранения данных. Разработанный веб-клиент ГИС удовлетворяет общим требованиям стандартов INSPIRE, и обеспечивает как запуск вычислительных сервисов для решения задач в области мониторинга климато-экологических изменений, так и представление результатов в растровых (PNG, JPG, GeoTIFF), векторных (KML, GML, Shape), и бинарных (NetCDF) форматах. Тестирование Веб-ГИС показало ее эффективность при решении прикладных задач и распространении результатов исследований в картографическом представлении.

**Ключевые слова:** геоинформационные системы, веб-технологии, пространственные данные, геосервисы, изменения климата

**Введение.** Наборы пространственных геофизических данных (данные метеорологических наблюдений, результатов моделирования и реанализа, спутниковых снимков и др.) широко используются для моделирования, оценки и прогноза климатических и экосистемных изменений. Данные, получаемые в результате выполнения множества научных проектов, имеют существенные различия в наборах предоставляемых переменных,

используемом синтаксисе, физических форматах файлов, что существенно усложняет их интеграцию и негативно влияет на эффективность их совместного анализа с точки зрения трудозатрат. Кроме того, современный уровень развития инструментов наблюдения за состоянием окружающей среды и климатических моделей высокого разрешения вызвал значительный рост объемов пространственных данных, необходимых для мониторинга и прогнозирования климатических изменений [8], что обусловило их географическую распределенность, и, как следствие, невозможность их обработки и интерпретации с использованием традиционных подходов, [1]. Проблемы, возникающие при обработке «больших данных», включают в себя их получение, обработку, хранение [18], поиск, обмен, передачу, визуализацию и анализ [23]. В данном случае, для выделения наличия у таких данных геопространственных особенностей, более корректно говорить о «больших геопространственных данных» (Geospatial big data) [21]. Следует отметить, что общепринятыми физическими форматами файлов, используемыми в системах хранения пространственных данных, являются форматы NetCDF (Network Common Data Form), HDF (Hierarchical Data Format, <http://www.hdfgroup.org/>), GRIB (GRIdded Binary, <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-2.html>).

Для комплексного использования больших разнородных наборов пространственных геофизических данных, а также для повышения качества и эффективности интегрированных научных исследований в области климато-экологических изменений необходимым является создание распределенной программной инфраструктуры [2, 19], основанной на концепции инфраструктуры пространственных данных (ИПД, Spatial Data Infrastructure) [22], представляющей собой систему базовых пространственных данных, метаданных, стандартов и регламентов, информационных узлов, геосервисов, и клиентских приложений для эффективного доступа и обмена геоинформационными ресурсами, а также их вычислительной обработки [4]. При этом единой точкой доступа к пространственным данным и продуктам их обработки в рамках концепции ИПД является геопортал [6, 7], предоставляющий возможность поиска геоинформационных ресурсов по каталогам метаданных, формирования выборок пространственных данных по их характеристикам (функциональность доступа), а также управления сервисами и приложениями обработки и картографической визуализации данных [5]. В настоящее время общепризнано, что разработка клиентских приложений как интегрированных элементов инфраструктуры должна основываться на использовании современных веб и ГИС-технологий [9, 13, 14, 24]. Таким образом, современные Веб-ГИС, как интегрированные приложения геопорталов ИПД, можно рассматривать как комплексы взаимосвязанных программных средств для работы с пространственными данными – их импорта/экспорта, каталогизации, обработки, визуализации, и т.д. Согласно требованиям директивы INSPIRE к визуализации пространственных данных на геопорталах [17], должны обеспечиваться такие стандартные возможности, как просмотр данных, навигация по изображениям, скроллинг, масштабирование и графический оверлей данных, а также отображение легенд карт и соответствующей метаинформации, то есть, фактически, должна предоставляться базовая функциональность классической ГИС.

**2. Обзор существующего программного обеспечения.** На сегодняшний день уже существует ряд информационных систем и сервисов, посвященных, в той или иной мере, обеспечению доступа, а также обработке и картографической визуализации

пространственно-привязанных геофизических данных. В качестве примеров можно привести такие продукты как RIMS (An Integrated Mapping and Analysis System with Application to Siberia, <http://RIMS.unh.edu/>) [20], GeoBrain Online Analysis System (GeOnAS, <http://geobrain.laits.gmu.edu/OnAS/>) [16], ncWMS [12], USGS National Climate Change Viewer [10] и др.

ПО RIMS представляет собой весьма успешную попытку реализации полнофункциональной ГИС в виде веб-приложения на основе MapServer (<http://mapserver.org/>) для обработки данных по метеорологии и гидрологии. Оно характеризуется такой функциональностью, как доступ к значениям данных для каждого пикселя цифрового картографического изображения, доступ к данным, агрегированным по пространственному и временному критериям, и включает инструменты поиска. Серьезным недостатком текущей версии системы является практически полное игнорирование стандартов ИПД, включая стандарты OGC, то есть система не предоставляет картографических сервисов как таковых, хотя и реализует их элементы в собственном оригинальном формате.

Другой системой для анализа пространственных данных, основанной на веб-сервисах, является GeoBrain Online Analysis System (GeOnAS). Она обеспечивает доступ к терабайтам спутниковой информации (NASA, USGS) посредством сервисов OGC, реализованных на основе открытого ПО GRASS GIS, и обладает развитым веб-интерфейсом, базирующемся на библиотеке DHTMLX (<http://dhtmlx.com/>). Предлагаемая функциональность ограничивается обработкой и визуализацией космических снимков (вычисление индекса NDVI, цветовые преобразования, и т.д.)

Сервис ncWMS (<http://www.resc.rdg.ac.uk/trac/ncWMS/>) является реализацией OGC WMS для наборов многомерных пространственных геофизических данных, в первую очередь в формате NetCDF. Форматы NetCDF, GRIB и HDF имеют концептуально много общего, и разделяют единую абстрактную модель Unidata Common Data Model (CDM, <http://www.unidata.ucar.edu/software/thredds/current/netcdf-java/CDM/>). CDM подразумевает использование определенных понятий (вертикальные координаты, 360-дневный календарь, и т.д.), практически не используемых в современных ГИС, что привело к тому, что такое ПО, как Geoserver и Mapserver, реализующее спецификации WMS, не поддерживает ряд форматов геоданных. ncWMS поддерживает двумерные графики временных рядов посредством выполнения запроса, при этом поддерживая обратную совместимость со стандартными WMS клиентами. Сервис уже широко используется при отображении пространственных данных в рамках инфраструктур данных и порталов по всему миру, при этом ограничивающими факторами является его минимальная поддержка стандартными ГИС и отсутствие полнофункциональной интеграции с такими продуктами как Geoserver (разделение прав пользователей, добавление источников данных, и т.д.).

USGS National Climate Change Viewer (NCCV, [http://www.usgs.gov/climate\\_landuse/clu\\_rd/nccv.asp](http://www.usgs.gov/climate_landuse/clu_rd/nccv.asp)) является веб-приложением, реализованном на Apache Flex, для проекций глобальных климатических моделей для территории США. Для обработки доступны десятки терабайт файлов климатических данных высокого разрешения. Приложение очень ограничено по функциональности, и может служить для просмотра конкретных характеристик предварительно обработанных (препроцессинг) данных моделирования по температуре и осадкам.

Также необходимо упомянуть такой продукт, как Unidata THREDDS (<http://www.unidata.ucar.edu/software/thredds/current/tds/TDS.html>). Он обеспечивает доступ к пространственным данным и метаданным через ряд протоколов, включая OPeNDAP, WMS, WCS и др. Одной из главных функций продукта является предоставление доступа к поднаборам данных (subsetting), но при этом отсутствует интегрированная поддержка геопроецирования. При этом следует отметить Инициативу Attribute Convention for Dataset Discovery (ACDD, Соглашение об атрибутах поиска наборов данных), поддерживаемую организацией ESIP Federation, <http://esipfed.org/>, определяющую список атрибутов NetCDF, рекомендованных для описания наборов данных для поисковых систем. Предполагается, что программное обеспечение, такое как Unidata THREDDS, будет использовать эти атрибуты наборов данных NetCDF для экспорта в такие стандарты, как Dublin Core, DIF, AND, FGDC, ISO 19115 и др.

Таким образом, наряду с разработкой сервисов пространственных данных как независимых геоинформационных ресурсов, предоставляющих исследователям возможности обработки разнородных геофизических данных, также особую важность приобретает создание специализированного программного обеспечения конечного пользователя в виде тематических Веб-ГИС приложений. Такое программное обеспечение было разработано авторами, его функциональность призвана обеспечить вычислительную поддержку в области климатического мониторинга на базе стандартов ИПД и принципов работы с большими пространственными данными.

**2. Общая архитектура.** Общая архитектура сервис-ориентированной геоинформационной веб-системы представлена тремя основными слоями (рис. 1):

1. Слой данных и низкоуровневых процедур их обработки, предоставляющий соответствующие картографические сервисы обработки и визуализации.
2. Слой промежуточного программного обеспечения в виде геопортала, включая центральный каталог метаданных и серверные веб-приложения.
3. Слой клиентских веб-приложений, отвечающий за графический интерфейс ГИС, доступный конечному пользователю.

**Слой данных и процедур их обработки** состоит из множества географически распределенных вычислительных систем, каждая из которых включает такие компоненты как:

1. Система хранения больших наборов пространственных геофизических данных, позволяющая хранить часто используемые значения (месячные и годовые климатические индексы, и т.д.), и, таким образом, обеспечивать различные представления («срезы») наборов данных. Список наборов данных в хранилищах системы приведен в Таблице 1.

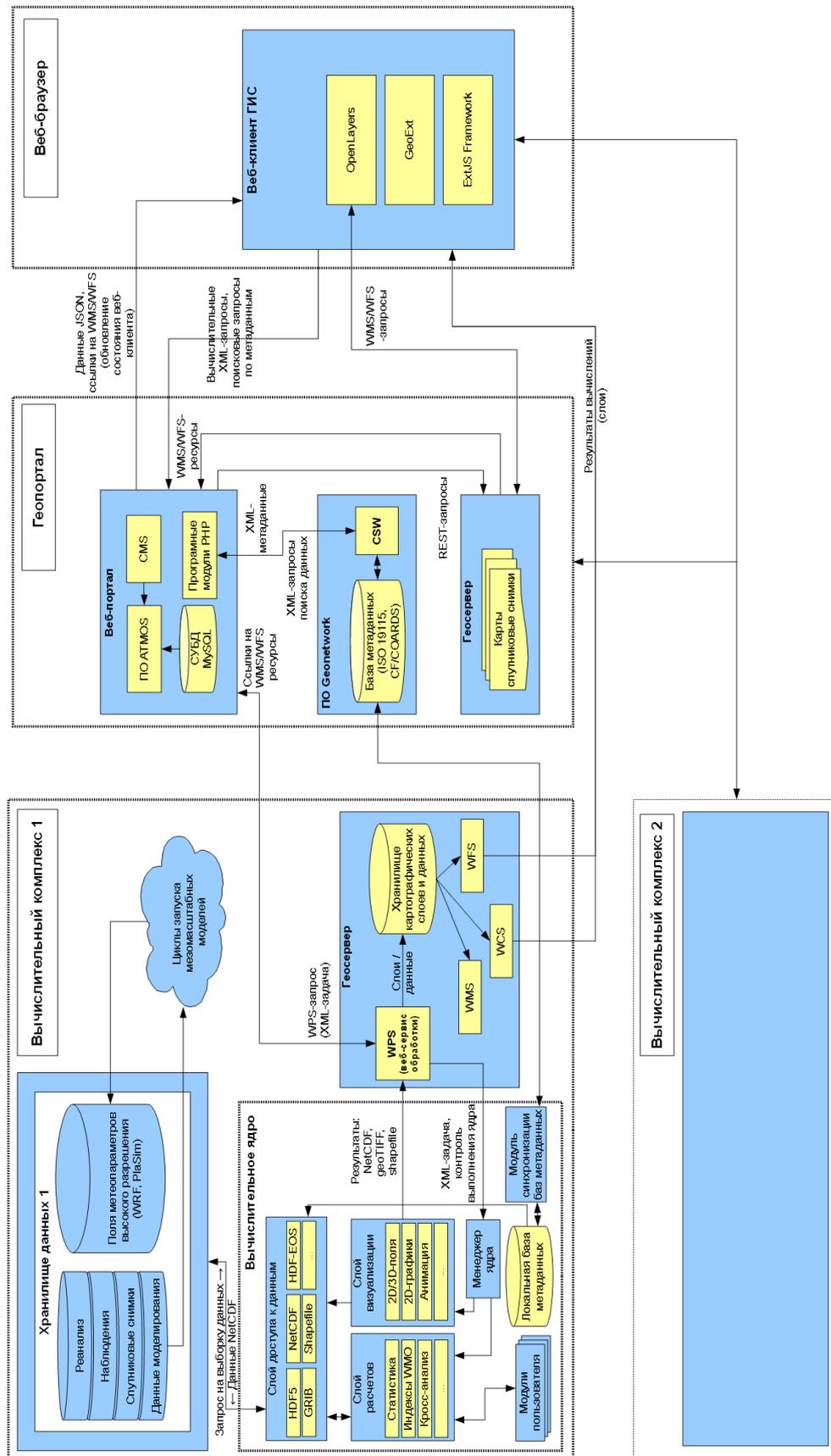


Рис. 1. Общая архитектура Веб-ГИС

**Таблица 1.** Список наборов данных

Наименование	Организация	Интервал	Разрешение
NCEP/NCAR Reanalysis	NCEP/NCAR	1951 – 2001	2.5°×2.5°
NCEP/DOE AMIP II Reanalysis	NCEP/DOE	1979 – 2003	2.5°×2.5°
ERA-40 Reanalysis	ECMWF	1957 – 2004	2.5°×2.5°
JRA-25 Reanalysis	JMA/CRIEPI	1979 – 2009	2.5°×2.5°
NOAA-CIRES 20th Century Global Reanalysis	NOAA/OAR/ESRL PSD	1908 – 1958	2.0°×2.0°
APHRODITE Reanalysis	RIHN-MRI/JMA	1951 - 2007	0.25°×0.25°;
Merra Reanalysis	ECMWF	1979 - 2000	0.67°×0.5°;
GPCC Reanalysis	GPCC	1901 - 2009	0.5°×0.5°;
INM CM4 dataset	INM RAS	1950 - 2005	2.0°×1.5°;
PlaSim dataset	IMCES SB RAS	2000 - 2100	2.5°×2.5°
9092c Synoptic Network	RIHMI-WDC/ NOAA CNDC	~ 1900 – 2000	83 meteo stations
MACC Reanalysis	ECMWF	2003 – 2012	0.25°×0.25°;

- База метаданных, содержащая многоязычные описания пространственно-временных характеристик всех наборов данных в формате NetCDF, доступных для обработки, в том числе расположение в иерархии файловой системы на СХД, а также детальные описания метеорологических и климатических параметров для каждого набора данных, включая возможные варианты их обработки, предлагаемые конечному пользователю.
- Модульное вычислительное ядро в виде независимого программного обеспечения для статистической обработки пространственных данных, являющегося вычислительным бэкендом для сервисов геопроессинга. На основе стандарта NcML (XML-версии «технических» метаданных NetCDF), была создана XML-схема для описания конфигурации процессов статистической обработки пространственных данных, выполняемых вычислительным ядром Веб-ГИС.
- Вычислительные и картографические веб-сервисы, с разделением прав доступа пользователей, для работы с растровыми (GeoTIFF) и векторными (Shapefile, PostGIS) пространственными данными на основе OGC WMS, WFS, WCS, WPS, базирующиеся на ПО Geoserver (<http://geoserver.org>).

**Слой промежуточного программного обеспечения** представляет собой геопортал как центральный элемент узла ИПД и включает:

- Веб-портал, реализующий веб-приложения в виде независимых PHP-классов, связь с веб-сервисами OGC, вычислительными системами и каталогом метаданных.
- Каталог метаданных на основе ПО GeoNetwork Opensource (<http://geonetwork->

[opensource.org](http://opensource.org)), реализующего поддержку стандартов ISO 19115/ISO 19119/ISO 19139/ISO 19110. Каталог метаданных обеспечивает публикацию информации о геоинформационных ресурсах согласно спецификации OGC CSW 2.0.

3. Репозиторий Geoserver, содержащий базовые картографические слои (границы, рельеф, растительность, и т.д.), а также данные дистанционного зондирования.

**Слой клиентских Веб-ГИС приложений** обеспечивает функциональность ГИС для конечного пользователя. Для реализации тематических приложений на базе сервисов пространственных данных в рамках геопортала локальной ИПД было выбрано следующее открытое программное обеспечение:

1. JavaScript библиотека OpenLayers (<http://openlayers.org>), обеспечивающая основную функциональность тонкого клиента Веб-ГИС.
2. JavaScript библиотеки GeoExt/ExtJS [15] для разработки клиентских веб-приложений с интуитивно-понятным интерфейсом, подобным интерфейсам таких распространенных настольных ГИС-приложений, как uDIG, QuantumGIS и т.д.

**3. Веб-клиент ГИС.** В картографическом веб-приложении (веб-клиенте ГИС) для работы с архивом наборов пространственных данных NetCDF можно выделить 3 слоя:

- Слой NetCDF-метаданных в формате JSON.
- Промежуточный слой JavaScript-объектов, реализующих методы для работы с:
  - NetCDF метаданными.
  - XML-файлом конфигурации задаваемых вычислений (XML-заданием).
  - Картографическими сервисами WMS/WFS.
- Графический интерфейс пользователя в виде JavaScript-объектов, реализующих общую логику приложения.

**3.1. Слой метаданных NetCDF.** Первоначально на основе СУБД MySQL была реализована база метаданных, содержащая подробные описания наборов пространственных данных. Слой метаданных веб-клиента представляет собой множество объектов JSON, созданных на основе таблиц СУБД, и отображающих информацию о наборах данных формата NetCDF (пространственное и временное разрешение, метеорологические параметры, допустимые процедуры обработки, и т.д.), которая содержится в реляционной базе метаданных MySQL. Структура объектов выбрана исходя из двух критериев:

1. Удобства заполнения интерактивных форм графического интерфейса пользователя.
2. Оптимальности процесса редактирования XML-файла конфигурации задаваемых вычислений.

Благодаря выбранному подходу оптимизируются процессы выборки необходимых значений параметров наборов данных, происходящие во время работы пользователя с интерфейсом Веб-ГИС.

**3.2. Промежуточный слой JavaScript-объектов.** Данный слой, реализующий методы для работы с NetCDF метаданными, XML-файлом задания, и картографическими сервисами WMS/WFS, является связывающим слой метаданных с графическим интерфейсом пользователя. Методы включают себя такие процедуры, как загрузка и обновление JSON-метаданных с использованием AJAX-запросов, редактирование XML-объекта задания, запуск и отслеживание процесса выполнения задания на удаленном вычислительном узле, а

также работа с картографическими сервисами WMS/WFS: получение списка слоев, представление слоев на карте, экспорт слоев в различные форматы согласно запросу пользователя.

**3.3. Графический интерфейс пользователя.** Данный слой базируется на связке JavaScript-библиотек OpenLayers, GeoExt и ExtJS и представляет собой набор программных компонентов, как независимых (информационные панели, кнопки, списки слоев), так и реализующих общую логику работы приложения (меню, тулбары, визарды, обработчики событий мыши и клавиатуры, и т.д.). Графический интерфейс выполняет две основные функции: предоставление возможностей редактирования XML-файла вычислительного задания и представление картографической информации пользователю. Разработанный веб-клиент ГИС удовлетворяет общим требованиям стандартов INSPIRE, и обеспечивает как запуск вычислительных сервисов для решения задач в области мониторинга климато-экологических изменений, так и представление результатов в виде картографических слоев WMS/WFS в растровых (PNG, JPG, GeoTIFF), векторных (KML, GML, Shape) и бинарных (NetCDF) форматах (рис. 2).

Таким образом, картографические сервисы пространственных данных могут быть использованы для работы, как в стандартных ГИС, так и в приложениях конечного пользователя геопортала (рис. 3).

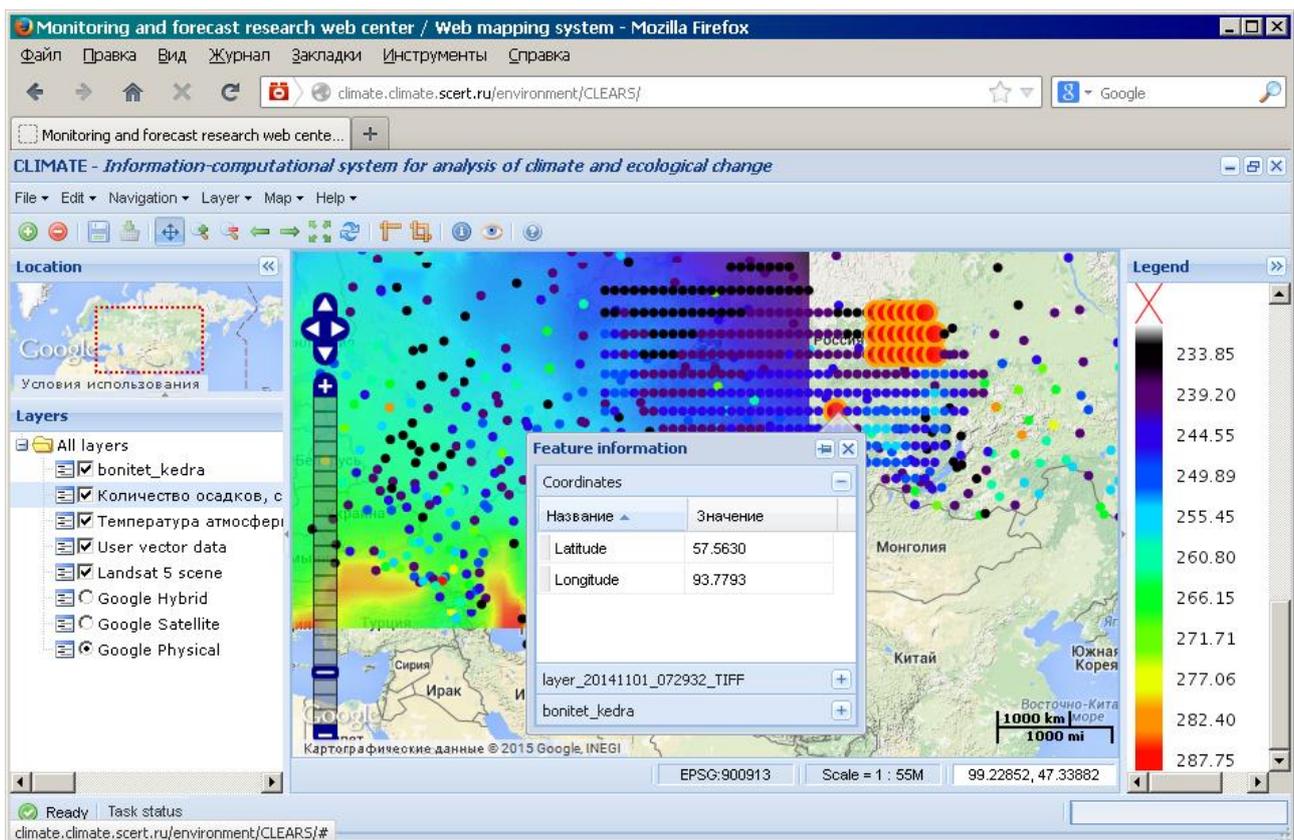


Рис. 2. Веб-клиент ГИС

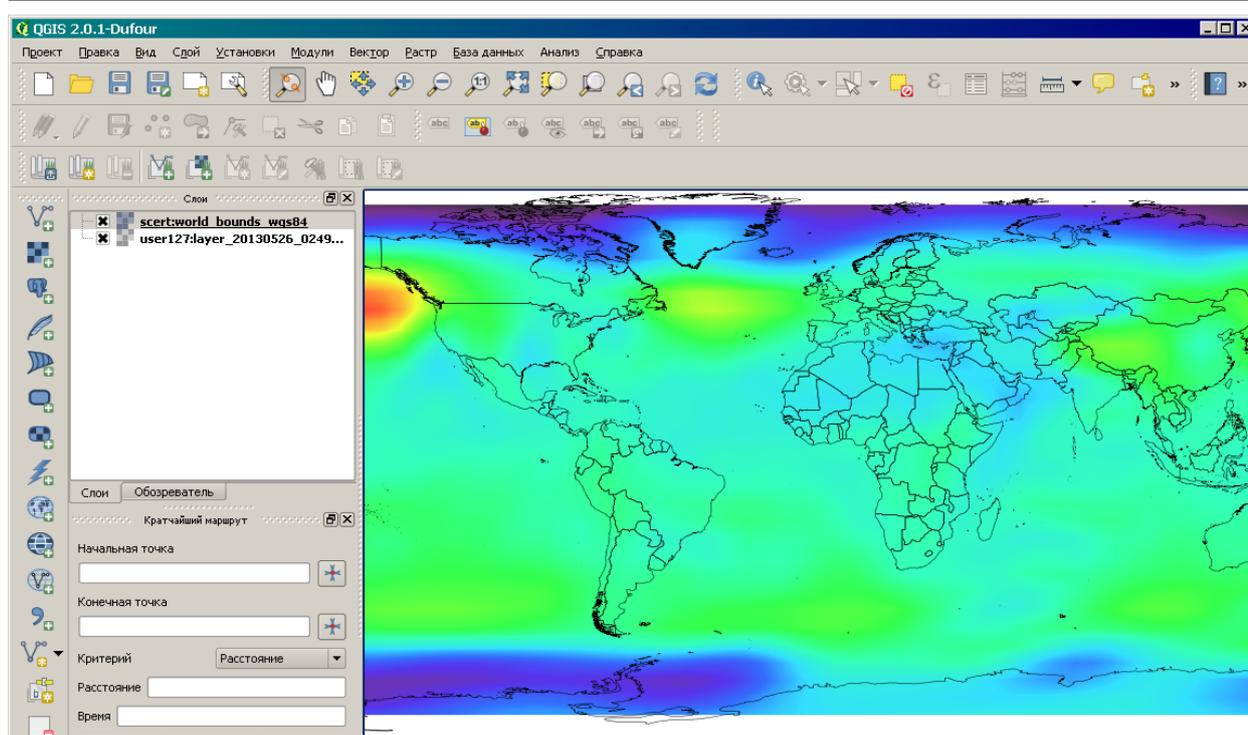


Рис. 3. Визуализация вычисленного WMS слоя в приложении QGIS

**Заключение.** В настоящее время аппаратное обеспечение Веб-ГИС представляет собой два вычислительных узла (высокопроизводительный сервер HP Proliant DL585 G7 для работы вычислительного ядра, сервер на базе двух Intel Xeon 5130 для работы геопортала и сервера веб-картографии) и сетевое хранилище пространственных климатических данных объемом до 230 Тб. Все оборудование объединено в сеть на скорости соединения 1 Гб/сек. Программное обеспечение базируется на продуктах Apache, MySQL, Php 5.6.0, Geoserver и Geonetwork. Специализированные сервисы пространственных геофизических данных, реализованные в рамках представленной архитектуры, обеспечивают их унифицированную распределенную обработку и представление в требуемых форматах с использованием стандартов OGC.

Реализованная распределенная архитектура в целом соответствует апробированной архитектуре OpenGeo [11], позволяет оперативно добавлять в систему новые вычислительные узлы, системы хранения данных, а также обеспечивает гибкую информационно-вычислительную поддержку исследований региональных климатических изменений с помощью современных веб- и ГИС технологий.

Рабочая версия системы показала свою эффективность в процессе решения реальных задач исследования динамики климатических изменений, а также распространения результатов исследований в картографической форме [3].

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.613.21.0037.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордов Е.П., Кабанов М.В., Лыкосов В.Н. Информационно-вычислительные технологии для наук об окружающей среде: подготовка научной смены // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11 (1). специальный выпуск. С. 3-15.

2. Гордов Е.П., Лыкосов В.Н. Развитие информационно-вычислительной инфраструктуры для интегрированного исследования окружающей среды Сибири // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. Специальный выпуск 2: Информационные технологии для эколого-биологических исследований. Междисциплинарный интеграционный проект СО РАН. С. 19-30.
3. Гордов Е.П., Лыкосов В.Н., Крупчатников В.Н., Окладников И.Г., Титов А.Г., Шульгина Т.М. Вычислительно-информационные технологии мониторинга и моделирования климатических изменений и их последствий / Е.П. Гордов, В.Н. Лыкосов, В.Н. Крупчатников и др. - Новосибирск: Наука. 2013. 199 с. ISBN 978-5-02-019146-4.
4. Демиденко А.Г. Технология построения инфраструктуры пространственных данных. URL: <http://www.gisa.ru/file/file2128.doc>.
5. Кошкарев АВ. Геопортал как инструмент управления пространственными данными и геосервисами // Пространственные данные, 2008, № 2. – С.6-14.
6. Кошкарев А.В., Ряховский В.М., Серебряков В.А. Инфраструктура распределенной среды хранения, поиска и преобразования пространственных данных. Открытое образование. 2010, № 5. С. 61-73.
7. Краснопеев С.М. Опыт развёртывания ключевых элементов инфраструктуры пространственных данных на базе веб-служб // Труды XIV Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2011). Санкт-Петербург. Россия. 2011. С. 92 – 99.
8. Лыкосов В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы. М.: Изд.-во Московского университета., 2012. 402 с.
9. Якубайлик О.Э. Геоинформационный Интернет-портал // Вычислительные технологии. Т. 12. Спец. выпуск 3. 2007. С. 116-125.
10. Alder, J. R., & Hostetler, S. W. Web based visualization of large climate data sets // Environmental Modelling & Software. 2015. Vol. 68. Pp. 175-180. doi:10.1016/j.envsoft.2015.02.016
11. L. Becirspahic and A. Karabegovic. Web portals for visualizing and searching spatial data // Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2015. 38th International Convention on. Opatija. 2015. Pp. 305-311. doi:10.1109/MIPRO.2015.7160284
12. J.D. Blower, A.L. Gemmell, G.H. Griffiths, K. Haines, A. Santokhee, X. Yang. A Web Map Service implementation for the visualization of multidimensional gridded environmental data // Environmental Modelling & Software. Volume 47. September 2013. Pp. 218–224. doi:10.1016/j.envsoft.2013.04.002
13. Dragicevic, S., Balram, S., Lewis, J. The role of Web GIS tools in the environmental modeling and decision-making process // 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada. September 2 - 8, 2000.
14. Frans J.M. van der Wel. Spatial data infrastructure for meteorological and climatic data // Meteorol. Appl. 12. 2005. Pp. 7-8. DOI:10.1017/S1350482704001471.
15. Shea Frederick, Colin Ramsay, and Steve Cutter Blades. Learning Ext JS. / Packt Publishing, 2008. 299 pp.

16. Weiguang Han, Liping Di, Peisheng Zhao, Xiaoyan Li, "Building an On-line Geospatial Analysis System with AJAX and Web Services," Services, IEEE Congress on. Pp. 408-413. 2009 Congress on Services – I. 2009.
17. Kathleen Janssen. The Availability of Spatial and Environmental Data in the European Union: At the Crossroads Between Public and Economic Interests / Kluwer Law International. 2010. ISBN 9041132872, 9789041132871, 617 p.
18. Dan Kusnetzky. [What is "Big Data?"](http://www.zdnet.com/blog/virtualization/what-is-big-data/1708). ZDNet. (Электронный ресурс: <http://www.zdnet.com/blog/virtualization/what-is-big-data/1708>)
19. Stefano Nativi, Mohan Ramamurthy, Bernd Ritschel. EGU-ESSI Position Paper. [Эл. ресурс]. — Режим доступа: <http://scert.ru/files/EGU-PositionPaper-final.pdf>
20. Prusevich A., Shiklomanov A., Lammers R. RIMS: An Integrated Mapping and Analysis System with Application to Siberia // Вычислительные и информационные технологии для наук об окружающей среде: избранные труды Международной школы и конференции CITES-2011. Томск. Россия. 3-13 июля 2011. Издательство Томского ЦНТИ. Томск. 2011. С 156 - 158.
21. Shekhar S. Spatial Big Data // Proc. AAG-NIH Symp. on Enabling a National Geospatial Cyberinfrastructure for Health Research. July 2012. Minneapolis. USA. (Электронный ресурс: [http://www.aag.org/galleries/project-programs-files/AAG\\_NIH\\_July2012\\_GeoFrontiers\\_Shekhar.pdf](http://www.aag.org/galleries/project-programs-files/AAG_NIH_July2012_GeoFrontiers_Shekhar.pdf))
22. Steiniger S., Hunter A.J.S. Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure. / In: Bocher E., Neteler M., (eds.), Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century. LNGC. Heidelberg. Springer. 2012a. Pp. 247-261.
23. Ashley Vance. [Start-Up Goes After Big Data With Hadoop Helper](http://bits.blogs.nytimes.com/2010/04/22/start-up-goes-after-big-data-with-hadoop-helper/?dbk). New York Times Blog. (Электронный ресурс: <http://bits.blogs.nytimes.com/2010/04/22/start-up-goes-after-big-data-with-hadoop-helper/?dbk>).
24. Vatsavai, Ranga Raju, Thomas E. Burk, B. Tyler Wilson, Shashi Shekhar. A Web-based browsing and spatial analysis system for regional natural resource analysis and mapping // Proc. of the 8th ACM int. symp. on Advances in geographic information systems. 2000. Washington, D.C., US., Pp. 95-101.

UDK 004.9

**WEB MAPPING SYSTEM DEVELOPMENT BASED ON GEOSPATIAL DATA  
PROCESSING AND VISUALIZATION SERVICES FOR REGIONAL CLIMATE CHANGE  
ANALYSIS AND FORECAST**

**Alexander G. Titov**

Researcher, e-mail: [titov@scert.ru](mailto:titov@scert.ru)

**Igor G. Okladnikov**

Ph.D., Senior researcher, e-mail: [oig@scert.ru](mailto:oig@scert.ru)

**Evgeny P. Gordov**

Dr., Professor, principal researcher, e-mail: [gordov@scert.ru](mailto:gordov@scert.ru)

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

10/3, Akademicheskii Ave., 634055, Tomsk, Russia

Tomsk Branch of Institute of Computational Technologies SB RAS

10/4, Akademicheskii Ave., 634055, Tomsk, Russia

**Abstract.** Geospatial datasets are actively used while performing scientific researches. Due to a number of objective reasons (inherent dataset heterogeneity, huge volume, etc) the development of geospatial data processing and visualization services as well as corresponding client applications is a quite complex task. In the paper a working prototype of service oriented web mapping system aiming at climate change analysis and forecast is presented. It is based on modern OGC/ISO standards of geospatial data services and approved open source software. The distributed architecture implemented allows smooth adding of new computing nodes and data storages. The Web GIS client developed complies with general INSPIRE requirements and provides data processing services usage for environmental change research as well as presenting calculation results in graphical (PNG, JPG, GeoTIFF), vector (KML, GML, Shape), and digital (NetCDF) formats. Web mapping system usage showed its effectiveness in the process of solving application tasks and dissemination of results in cartographical form.

**Keywords:** geographic information system, web technologies, geospatial data, geoservices, climate change

### References

1. Gordov E.P., Kabanov M.V., Lykosov V.N. Informatsionno-vychislitelnyye tekhnologii dlya nauk ob okruzhayushchey srede: podgotovka nauchnoy smeny [Information-computational technologies for environmental sciences: preparation of young scientific generation] // Vychislitelnyye tekhnologii. 2006. No. 11 (1). special edition. Pp. 3-15. (in Russian)
2. Gordov E.P., Lykosov V.N. Razvitiye informatsionno-vychislitelnoy infrastruktury dlya integrirovannogo issledovaniya okruzhayushchey sredy Sibiri [Development of information-computational infrastructure for integrated research of Siberia environment] // Vychislitelnyye tekhnologii. 2007. No. 12. special edition # 2: Information technologies for ecological and biological research. Interdisciplinary integration project SB RAS. Pp. 19-30. (in Russian)

3. Gordov E.P., Lykosov V.N., Krupchatnikov V.N., Okladnikov I.G., Titov A.G., Shulgina T.M. Vychislitelno-informatsionnyye tekhnologii monitoringa i modelirovaniya klimaticheskikh izmeneniy i ikh posledstviy [Information-computational technologies of monitoring and modeling of climate change and its consequences] / E.P. Gordov. V.N. Lykosov. V.N. Krupchatnikov, etc. Novosibirsk: Nauka. 2013. 199 p. ISBN 978-5-02-019146-4. (in Russian)
4. Demidenko A.G. Tekhnologiya postroyeniya infrastruktury prostranstvennykh dannykh [Spatial data infrastructure building technology] Available at: <http://www.gisa.ru/file/file2128.doc>. (in Russian)
5. Koshkarev AV. Geoportal kak instrument upravleniya prostranstvennymi dannymi i geoservisami [ Geoportal as a tool for spatial data and geoservices management ] // Spatial data. 2008. No. 2. Pp. 6-14. (in Russian)
6. Koshkarev A.V., Ryakhovskiy V.M., Serebryakov V.A. Infrastruktura raspredelennoy sredy khraneniya poiska i preobrazovaniya prostranstvennykh dannykh [Distributed environment infrastructure for storage, search and transformation of spatial data] // Open education. 2010. No. 5. Pp. 61-73. (in Russian)
7. Krasnopeyev S.M. Opyt razvertyvaniya klyuchevykh elementov infrastruktury prostranstvennykh dannykh na baze veb-sluzhbb [ Results of the deployment of spatial data infrastructure key elements based on web-services] // Proceedings of XIV All-Russian united conference «Internet and Modern Society» (IMS-2011). Saint-Petersburg. Russia. 2011. Pp. 92 – 99. (in Russian)
8. Lykosov V.N., Glazunov A.V., Kulyamin D.V., Mortikov E.V., Stepanenko V.M. Superkompyuternoye modelirovaniye v fizike klimaticheskoy sistemy [ Climate system physics supercomputing modeling ] Moscow: Moscow State University Publ. 2012. 402 p. (in Russian)
9. Yakubaylik O.E. Geoinformatsionnyy Internet-portal [Geoinformation Internet portal ] // Vychislitelnyye tekhnologii. No. 12. special edition No. 3. 2007. Pp. 116-125. (in Russian)
10. Alder, J.R., & Hostetler, S.W. Web based visualization of large climate data sets // Environmental Modelling & Software. 2015. Vol. 68. Pp. 175-180. doi:10.1016/j.envsoft.2015.02.016
11. L. Becirspahic and A. Karabegovic. Web portals for visualizing and searching spatial data // Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2015 38th International Convention on, Opatija, 2015, pp. 305-311. doi: 10.1109/MIPRO.2015.7160284
12. J.D. Blower, A.L. Gemmell, G.H. Griffiths, K. Haines, A. Santokhee, X. Yang. A Web Map Service implementation for the visualization of multidimensional gridded environmental data // Environmental Modelling & Software. Volume 47. September 2013. Pp. 218–224. doi:10.1016/j.envsoft.2013.04.002
13. Dragicevic, S., Balram, S., Lewis, J. The role of Web GIS tools in the environmental modeling and decision-making process // 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000.
14. Frans J. M. van der Wel. Spatial data infrastructure for meteorological and climatic data // Meteorol. Appl. 12, 2005. Pp. 7-8. DOI:10.1017/S1350482704001471.
15. Shea Frederick, Colin Ramsay, and Steve Cutter Blades. Learning Ext JS. / Packt Publishing. 2008. 299 p.

16. Weiguo Han, Liping Di, Peisheng Zhao, Xiaoyan Li, "Building an On-line Geospatial Analysis System with AJAX and Web Services". Services. IEEE Congress on. Pp. 408-413. 2009 Congress on Services - I, 2009.
17. Kathleen Janssen. The Availability of Spatial and Environmental Data in the European Union: At the Crossroads Between Public and Economic Interests / Kluwer Law International. 2010. ISBN 9041132872, 9789041132871. 617 p.
18. Dan Kusnetzky. [What is "Big Data?"](http://www.zdnet.com/blog/virtualization/what-is-big-data/1708). ZDNet. Available at: <http://www.zdnet.com/blog/virtualization/what-is-big-data/1708>
19. Stefano Nativi, Mohan Ramamurthy, Bernd Ritschel. EGU-ESSI Position Paper. Available at: <http://scert.ru/files/EGU-PositionPaper-final.pdf>
20. Prusevich A., Shiklomanov A., Lammers R. RIMS: An Integrated Mapping and Analysis System with Application to Siberia // Computing and information technologies for sciences about the environment: separate operations of the International school and conference CITES-2011. Tomsk. Russia. July 3-13, 2011. Publishing house of the Tomsk CSTI. Tomsk. 2011. Pp. 156 - 158.
21. Shekhar S. Spatial Big Data // Proc. AAG-NIH Symp. on Enabling a National Geospatial Cyberinfrastructure for Health Research. July 2012. Minneapolis. USA. Available at: [http://www.aag.org/galleries/project-programs-files/AAG\\_NIH\\_July2012\\_GeoFrontiers\\_Shekhar.pdf](http://www.aag.org/galleries/project-programs-files/AAG_NIH_July2012_GeoFrontiers_Shekhar.pdf)
22. Steiniger S., Hunter A.J.S. Free and open source GIS software for building a spatial data infrastructure / In: Bocher E., Neteler M., (eds.), Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century, LNGC. Heidelberg. Springer. 2012a. Pp. 247-261.
23. Ashley Vance. [Start-Up Goes After Big Data With Hadoop Helper](http://bits.blogs.nytimes.com/2010/04/22/start-up-goes-after-big-data-with-hadoop-helper/?dbk). New York Times Blog. Available at: <http://bits.blogs.nytimes.com/2010/04/22/start-up-goes-after-big-data-with-hadoop-helper/?dbk>.
24. Vatsavai, Ranga Raju, Thomas E. Burk, B. Tyler Wilson, Shashi Shekhar. A Web-based browsing and spatial analysis system for regional natural resource analysis and mapping // Proc. of the 8th ACM int. symp. on Advances in geographic information systems. 2000. Washington. D.C. US. Pp. 95-101.

## МЕТОД ОБРАБОТКИ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАМКАХ МОДЕЛИ MAPREDUCE

Авраменко Юрий Владимирович

Программист, e-mail: [avramenko@icc.ru](mailto:avramenko@icc.ru)

Шумилов Александр Сергеевич

Аспирант, e-mail: [shumsan1011@gmail.com](mailto:shumsan1011@gmail.com)

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова  
СО РАН, 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 134

**Аннотация.** В данной статье предлагается метод обработки растровых изображений, на основе использования модели распределенных вычислений MapReduce. Распределение растровых изображений между узлами вычислительной сети осуществляется разработанными обработчиками для операций Map и Reduce. Обработчики распределяют и собирают растровые изображения на основе спецификаций. Спецификации содержат в себе информацию о способе распределения и сборе данных. Предлагаемый метод позволяет использовать инструменты пространственного анализа растровых изображений в распределенной вычислительной среде без их модификации.

**Ключевые слова:** MapReduce, WPS, SVM, GEOTIFF, spatial data, image processing.

**Введение.** В области геоинформационных технологий происходит увеличение объемов доступной для обработки информации. Часто возникает ситуация, когда увеличение объемов обрабатываемых данных затрудняет их обработку в силу более высоких требований к аппаратной части или временным затратам. Для уменьшения времени выполнения вычислений или более оптимального использования аппаратных мощностей разрабатываются новые и развиваются существующие подходы выполнения распределенных вычислений.

Одним из наиболее популярных подходов к обработке данных является реализация вычислений на основе модели распределенных вычислений MapReduce [5]. Свободно доступная реализация MapReduce – Apache Hadoop [6] позволяет осуществлять контроль и управление вычислительными узлами, а так же предоставляет такие средства, как распределенная файловая система (единое файловое пространство для выполняемых сервисов), и собственная распределенная СУБД. Расширение Spatial Hadoop [7] ориентировано на работу с большими массивами данных. Особый интерес вызывает гибридный подход HadoopDB [3], включающий распределенную СУБД Postgres и Apache Hadoop. Суть HadoopDB состоит в связывании нескольких одноузловых систем баз данных с использованием Apache Hadoop в качестве координатора задач и сетевого коммуникационного слоя MapReduce.

В работе [1] авторы предлагают на основе Apache Hadoop и MapReduce систему обработки изображений с автоматическим распараллеливанием данных между вычислительными узлами. Система состоит из двух частей Apache Hadoop и реализованных

обработчиков изображений с аппаратно программным интерфейсом (API), встроенных в пакет Image Processing Library. Система ориентирована на обработку коллекции независимых изображений. В статье [4] авторы использовали Hadoop-GIS для обработки пространственных данных. Входные данные содержат множество полигональных, точечных или других объектов. Данные разделяются на блоки и распределяются между вычислительными узлами. При таком подходе возникает ситуация, когда один объект содержится в двух и более блоках одновременно и необходимо определить, к какому блоку его отнести. Для решения этой задачи авторы предлагают два способа. Первый – исключить эти объекты из обработки и потерять малую часть данных. Второй – выполнить дополнительные вычисления по обработке конфликтных ситуаций. В этом случае достигается точный результат, а общее время работы увеличивается незначительно. Основное отличие данной работы заключается в том, что в силу специфики распределенной системы нет возможности настроить общую распределенную систему хранения и передачи данных. Описанный подход по обработке конфликтных ситуаций в [6] является перспективным, он будет более подробно рассмотрен, улучшен и адаптирован для целей данной работы.

Существует широкий выбор программных систем геообработки, имеющих на рынке. Однако, несмотря на обилие систем, реализующих программную модель MapReduce, остается открытым вопрос применения модели MapReduce для программных систем, ее не поддерживающих, для обработки пространственных данных. Все чаще эти программные системы реализуют в виде Web-сервисов, но не решается вопрос разделения и сборки пространственных данных и управления распределенным вычислением для применения этих систем без программирования. Также стоит отметить, что в большинстве реализаций программной модели MapReduce необходим контроль над вычислительными узлами, на которых будет развертываться система, в то время как при большом количестве сервисов, работающих на совершенно разных, как аппаратных, так и программных платформах, под управлением сторонних разработчиков осуществлять прямое управление и настройку узлов практически невозможно. Для решения данной проблемы предлагается метод обработки растровых изображений в рамках модели распределенных вычислений MapReduce, которая позволяет использовать инструменты пространственной обработки в распределенной вычислительной среде без их модификации. В ИДСТУ СО РАН был предложен оригинальный способ контроля выполнения сервисов [2] в виде функций на языке JavaScript, которые можно использовать в JavaScript сценариях наравне со стандартными конструкциями языка. Способ [2] позволяет выполнять сервисы в автоматическом режиме, а также поддерживает длительно выполняющиеся сервисы и передачу данных.

**1. Постановка задачи.** В ИДСТУ СО РАН ведётся разработка и развитие геопортала, одной из функций которого является предоставление инструментов пространственной обработки данных в виде WPS-сервисов (Web Processing Service). WPS — это стандарт интерфейса Web-сервисов, реализующих пространственную обработку растровых и векторных данных, а также доступ к пакетам геомоделирования, инструментам статистики и обработки через Интернет.

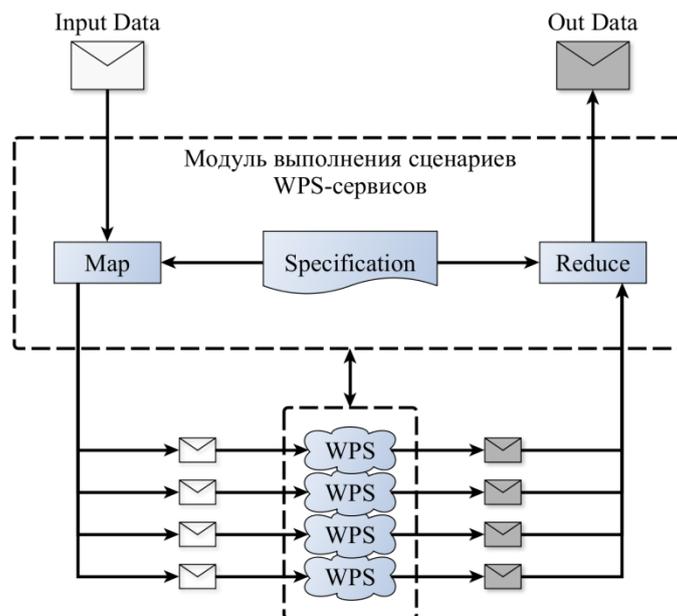
Приведем краткое описание некоторых из них. Сервис обработки данных радарной топографической съемки (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) применяется во многих задачах, в частности для вычисления уклона (анг. - slope) и экспозиции (анг. - aspect). Уклон

представляет скорость изменения высоты для каждой ячейки цифровой модели рельефа Digital Elevation Model (DEM). Экспозиция устанавливает направление уклона максимальной скорости изменения значений от каждой ячейки до соседних. Сервис вычислений вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), применяется для определения параметров растительности в данном пикселе снимка. Разработаны сервисы, реализующие операции картографической алгебры, выполняющие сложение/вычитание, умножение/деление растровых данных в формате GEOTIFF. Данные операции позволяют выполнять различные методики, в частности, получение изменений между двумя файлами с помощью операции вычитания, различные свертки набора файлов и т.д. Сервис классификации данных методом опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) на основе прецедентов, хорошо зарекомендовал себя в области обработки пространственных данных.

Рассмотрим особенности обработки пространственных данных перечисленными инструментами. Некоторым инструментам пространственного анализа для корректной работы достаточно обработать каждый пиксель входного растра независимо от других пикселей. В этом случае достаточно будет разделить входные данные на  $N$  равных частей и произвести обработку, затем собрать полученные данные. Другие инструменты работают с каждым пикселем входного растра и его окрестностью, поэтому для корректной обработки входные данные придется разбивать с некоторым перекрытием и определить, как поступать с повторяющимися результатами на шаге Reduce, т.е. усреднить результат, выбрать экстремальное значение, объединить, вычесть и т.д.

Операции над пространственными данными, которые используются в Map и Reduce, повторяются для различных инструментов геообработки ввиду общности обрабатываемых данных. В настоящей работе предлагается метод, включающий в себя обработчики для операций Map и Reduce и спецификации, на основе которых будет происходить процесс распределения и сбора данных среди вычислительных узлов.

**2. Обработка растровых изображений в рамках модели распределенных вычислений MapReduce.** Метод обработки растровых изображений основывается на реализованном в ИДСТУ СО РАН способе контролирования процесса выполнения сервисов[2]. Программно Map и Reduce обработчики представляют собой библиотеки, встраиваемые в модуль выполнения сценариев WPS-сервисов. При выполнении сценария модуль определяет, какому вызову сервиса сопоставляется спецификация. При наличии спецификации происходит анализ вычислительных узлов, поддерживающих выполнение данного сервиса. В зависимости от настроек распределения входных данных, определенных в спецификации, производится разделение входных данных с последующим вызовом копий сервисов на удаленных серверах. Модуль выполнения сценариев последовательно опрашивает выполняемые копии сервисов, и как только последняя копия сервиса завершает свою работу, все результаты работы копий скачиваются модулем и происходит процесс сборки результата в соответствии с правилами, определенными в спецификации. Файлы, получающиеся в результате процесса сборки, передаются дальнейшим участникам сценария. На рис. 1 изображена схема работы метода обработки растровых изображений.



**Рис. 1.** Схема метода обработки растровых изображений в рамках модели MapReduce

Приведем описание некоторых элементов данного метода. Обработчик операции Map включает реализованные функции чтения спецификаций, на их основе формируются параметры для распределения растровых данных между вычислительными узлами. Для разделения данных формируются параметры запуска утилиты GDAL TRANSLATE, предназначенной для конвертации растров. Обработчик операции Reduce включает реализованные функции чтения спецификаций и реализованные обработчики сбора данных. Обработчики данных реализуют стандартные функции обработки конфликтных ситуаций, возникающих в процессе сбора данных. Конфликтные ситуации возникают, например, при сборе частей мозаики растра в одно целое. К таким ситуациям можно отнести поступление повторяющихся или неоднозначных данных. В этом случае обработчик применяет к ним операцию, указанную в спецификации. В текущей версии доступны следующие операции: max – установить максимальное значение из двух перекрывающихся пикселей, min – установить минимальное значение из двух перекрывающихся пикселей, avg – вычислить среднее значение из двух перекрывающихся пикселей.

Спецификации написаны в формате JavaScript Object Notation (JSON). Настройки спецификаций позволяют указывать минимальные и максимальные размеры ячейки для обработки, позволяя операции Map самостоятельно определять размер ячеек для оптимальной загрузки вычислительных узлов вызываемыми сервисами (в этом случае в обработчик также сообщается число вычислительных узлов). Это позволяет произвести расчет ячейки на основе стратегии равномерной загрузки вычислительных узлов, то есть обработчик стремится занять как можно большее число узлов, при этом максимизируя размер ячейки и минимизируя число вызовов сервиса на каждом узле в целях минимизации расходов на соединение и передачу данных. Спецификации для операции Map содержат следующую информацию: ширину и высоту ячейки данных, ширину полосы перекрывающихся пикселей для соседних ячеек. Спецификации для операции Reduce содержат название метода, применяемого на шаге сбора полученных результатов, для обработки перекрывающихся пикселей.

**Заключение.** В данной статье предложен метод автоматизации параллельного применения инструментов пространственного анализа растровых изображений в рамках модели распределенных вычислений MapReduce. Отличительной чертой данного метода является возможность использования инструментов обработки пространственных данных в распределенной вычислительной среде без их модификации. Разработаны и реализованы обработчики для операций Map и Reduce, которые позволяют управлять процессом распределения и сбора обрабатываемых данных независимо от инструментов пространственной обработки. На основе спецификаций можно указать способ распределения и сбора обрабатываемых данных. Предлагаемый метод не требователен к вычислительным узлам.

Работа выполнена при поддержке центра коллективного пользования ИИВС ИРНОК и гранта РФФИ № 16-37-00110.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Созыкин А.В., Гольдштейн М.Л. Система обработки изображений с автоматическим распараллеливанием на основе MapReduce // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2012. No. 27 (286). С. 109 – 118.
2. Фёдоров Р.К., Шумилов А.С. WPS-сервисы пространственного анализа состояния окружающей среды и природных ресурсов // Инфраструктура научных информационных ресурсов и систем. 2014. Т. 2. С. 66 – 74.
3. Abouzeid A., Bajda-Pawlikowski K., Abadi D., Silberschatz A., Rasin A. HadoopDB: An Architectural Hybrid of MapReduce and DBMS Technologies for Analytical Workloads. // Proceedings of the 35th VLDB Conference. 2009.
4. Aji A., Wang F., Vo H., Lee R., Liu Q., Zhang X., Saltz J. Hadoop: GIS: A High Performance Spatial Data Warehousing System over MapReduce // The 39th International Conference on Very Large Data Bases. 2013. Vol. 6. No. 11. pp. 1009-1020.
5. Dean J., Ghemawat S. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters // Sixth Symposium on Operating System Design and Implementation. 2004.
6. Hadoop. Режим доступа: <http://hadoop.apache.org/> (дата обращения 18.04.2012).
7. Spatialhadoop. Режим доступа: <http://spatialhadoop.cs.umn.edu/> (дата обращения 18.04.2012).

## PROCESSING OF RASTER IMAGES BASED ON MAPREDUCE MODEL

Yuriy V. Avramenko

Programmer, e-mail: [avramenko@icc.ru](mailto:avramenko@icc.ru)

Alexander S. Shumilov

Graduate student, e-mail: [shumsan1011@gmail.com](mailto:shumsan1011@gmail.com)

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 134, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia,

**Abstract.** In this paper we propose a method within MapReduce model for processing raster images. Special components have been designed for Map and Reduce operations based on the specifications. Specification define the way input and output data should be processed. Map and Reduce operations are performed according to the designed specifications. Each of computational nodes is selected for processing specific part of input geospatial data that is called cell. Advantage of the proposed method within MapReduce model for processing raster images is to provide geospatial data processing within MapReduce model for web-services without extra programming.

**Keywords:** MapReduce, WPS, SVM, GEOTIFF, spatial data, image processing.

Actual work is completed with the help of the Center of collective use of the IICN ISSC and RFBR, grant number 16-37-00110.

### References

1. Sozykin A.V., Gol'dshtejn M.L. Sistema obrabotki izobrazhenij s avtomaticheskim rasparallelivaniem na osnove MapReduce [Processing system of images with automatically distribution based on Mapreduce] // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. No. 27 (286). Pp. 109-118. (in Russian)
2. Fjodorov R.K., Shumilov A.S. WPS-servisy prostranstvennogo analiza sostojanija okruzhajushhej sredy i prirodnyh resursov [WPS-services of spatial analysis of the environment condition and natural resources] // Infrastruktura nauchnyh informacionnyh resursov i sistem. 2014. T. 2. Pp. 66 – 74. (in Russian)
3. Abouzeid A., Bajda-Pawlikowski K., Abadi D., Silberschatz A., Rasin A. HadoopDB: An Architectural Hybrid of MapReduce and DBMS Technologies for Analytical Workloads // Proceedings of the 35th VLDB Conference. 2009.
4. Aji A., Wang F., Vo H., Lee R., Liu Q., Zhang X., Saltz J. Hadoop: GIS: A High Performance Spatial Data Warehousing System over MapReduce // The 39th International Conference on Very Large Data Bases. 2013. Vol. 6. No. 11. Ppp. 1009-1020.
5. Dean J., Ghemawat S. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters. // Sixth Symposium on Operating System Design and Implementation. 2004.
6. Hadoop. Available at: <http://hadoop.apache.org/>, accessed 20.02.2016.
7. Spatialhadoop. Available at: <http://spatialhadoop.cs.umn.edu/>, accessed 20.02.2016.

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КАРТ НА ОСНОВЕ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕРРИТОРИИ МУНИЦИПАЛЬНОГО РАЙОНА

**Черкашин Александр Константинович**

Д.г.н., профессор, зав. лабораторией «Теоретическая география»,  
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1, e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Лесных Светлана Ивановна**

К.г.н., с.н.с. лаборатории «Теоретическая география»,  
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1, e-mail: [tyara@irigs.irk.ru](mailto:tyara@irigs.irk.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются методы расчета интегральных показателей (ИП) состояния среды, которые объединяют разнокачественную пространственную информацию о географическом положении объектов с учетом научных принципов квалиметрии. Объективность расчета ИП обеспечивается применением статистического метода главных компонент, принимающих во внимание эти принципы. Первая главная компонента отражает максимум вариации информации о геосистеме, вторая - характеризует устойчивый средовой фон. Их различие для каждого местоположения соответствует потенциалу изменчивости геосистемы — степень отклонения от местной средовой нормы. Приведена картограмма по результатам расчетов ИП, основанных на данных лесоустройства Слюдянского лесхоза в границах Слюдянского муниципального района Иркутской области.

**Ключевые слова:** интегральные показатели и карты, методика расчета интегральных показателей, интегральное тематическое картографирование, муниципальный район.

**Введение.** Проблема создания тематических оценочных карт интегрального содержания, объединяющих пространственную информацию карт комплексных атласов территорий, сводится к задаче статистической свертки информации баз данных с последующей ее трансформацией в соответствии с целевой функцией оценивания. Интегральные карты дают оценку потенциальных свойств участков территории для комфортного проживания и эффективной хозяйственной деятельности населения, использования ресурсов разными отраслями хозяйства. В них должны учитываться особенности географического положения и весь спектр природных и социально-экономических факторов, влияющих на территориальное развитие. Территория характеризуется статистическими показателями состояния природных или интегральных природно-экономических систем и условиями географической среды жизнедеятельности.

На интегральной карте одновременно должны отображаться как изменчивое состояние пространственного объекта, так и устойчивое состояние его внешней среды. Они могут быть как инвентаризационными (аналитическими и комплексными), оценочными и синтетическими, так и системными картами, иллюстрирующими пространственные

закономерности взаимодействия природы и общества. В связи с этим ставятся задачи разработки методов вычисления интегральных показателей, естественным образом характеризующих систему и её среду, и их визуализации в виде интегральных карт различного тематического содержания.

**1. Интегральные показатели.** Интегральный показатель (ИП) объединяет частные характеристики в виде сводных, синтетических характеристик систем. Предполагается, что показатели состояния системы  $x$  и ее изменчивой части  $\Delta x$  связаны через среду  $x_0$ :  $x = x_0 + \Delta x$ . Исследователь наблюдает систему как целое, характеризует ее состояние через набор показателей  $x = \{x_i\}$ ,  $i=1,2,3...n$ . Из этого набора надо выделить собственные характеристики системы  $\Delta x$  и характеристики  $x_0$ , обусловленные средой. Например, измеряются влияющие факторы  $x$ , которые проявляются в конкретном процессе на фоне условий  $x_0$ ; действующая часть фактора (положительные и отрицательные отклонения) рассчитывается как разность  $\Delta x = x - x_0$ , а остальная часть значений  $x$  обуславливается средовым фоном  $x_0$ .

В общем случае любой ИП  $y_j(t)$  местоположения  $t$  статистически оценивается интегралом или суммой частных показателей  $x_i(t)$  с весовыми коэффициентами  $a_{ij}(t)$ :

$$y_j(t) = \sum_i a_{ij}(t)x_i(t), a_{ij} = \frac{\partial y_j}{\partial x_i}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Коэффициенты  $a_{ij}(t)$  изменяются от места к месту и во времени, что заметно усложняет статистическую обработку изменчивых пространственных данных.

Всякий ИП может рассматриваться как показатель качества в терминах географической квалиметрии. В общем смысле квалиметрия – это наука и совокупность методов об измерении и количественной оценке качества всевозможных предметов и процессов. В географической интерпретации квалиметрические принципы [1, 4] отражаются в иерархии геосистем и географических сред, их свойств и характеристик, централизованных относительно средних значений и нормированных по величине среднеквадратических отклонений. Средние значения выражают некоторый эталон (стандарт, норму, фон) сравнения, а в основе нормирования лежит определение допустимых отклонений от эталона.

Статистическим методом, принимающим во внимание указанные требования квалиметрии, в частности, проверку на коррелированность показателей и преобразование их в централизованные и нормированные значения, является метод главных компонент (МГК) [6] обработки массивов многомерных данных. Строится корреляционная матрица связи атрибутивных значений, для которой вычисляются ее собственные значения и векторы, элементы которых рассчитываются по формулам вида (1); эти векторы являются главными компонентами (ГК), ранжированными по величине собственных значений корреляционной матрицы. Такая математически строго обоснованная процедура позволяет получить спектр независимых ИП в виде ГК на основе знаний тесноты корреляционных связей характеристик систем с автоматическим расчетом весов каждого показателя и ранжированием ГК по степени учета ими изменчивости исходной информации по величине соответствующих собственных значений. Полученные значения ГК некоррелированы, т.е. образуется пространство независимых координат, по положению в которых разных объектов решаются многие статистические задачи, например, классификация участков ландшафтов. Первая ГК  $(y_1)$  отражает максимум вариации информации о системе, а остальные, преимущественно

вторая ГК2 ( $y_2$ ), относятся к средовому фону. Полезный сигнал  $\Delta y = y_1 - \alpha y_2$  выражает потенциал изменчивости, разный для различных местоположений, который может картографироваться, как и остальные ИП. Величина  $\Delta y$  указывает на масштаб происходящих в системе изменений относительно ее средового фона и индивидуально характеризует систему, а коэффициент  $\alpha$  отражает соотношение темпов изменения  $y_1$  и  $y_2$  [7].

Реализация такого подхода основывается на следующих теоретических представлениях. Рассматривается аналитическая функция состояния системы  $y(x)$ , интегрально выражающая состояния ее элементов через частные показатели  $x = \{x_i\}$ . Используем для этой функции преобразование Лежандра

$$y(x) = \sum_i a_i x_i + f(a), \quad a_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

переводящего исходную функцию  $y(x)$  в производную функцию  $f(a)$ ,  $a = \{a_i\}$ . Переменная  $f(a)$  – обобщенная функция чувствительности состояния системы к влиянию различных показателей  $x = \{x_i\}$ , и в этом смысле она характеризует потенциал и направленность изменчивости системы. Предполагается [8], что с высокой точностью  $f(a) = -\sum_i a_i x_{0i} + y(x_0)$ , где  $x_0 = \{x_{0i}\}$  – постоянные характеристики среды, в которых изменяется система. Тогда

$$\Delta y = y(x) - y(x_0) = \sum_i a_i (x_i - x_{0i}) = \sum_i a_i x_i - \sum_i a_i x_{0i} \quad (3)$$

- изменение состояния системы относительно среды определяется разностью ИП состояния системы и ИП состояния ее среды.

Вектор  $a = \{a_i\}$  определяется двойственными относительно  $x = \{x_i\}$  координатами  $a_i$ , поэтому уравнение (2) оказывается симметрично при замене переменных  $x \leftrightarrow a$ ,  $y \leftrightarrow f$ , которая для соотношения (3) дает

$$\Delta f = f(a) - f(a_0) = \sum_i (a_i - a_{0i}) x_i = \sum_i a_i x_i - \sum_i a_{0i} x_i. \quad (4)$$

- относительная чувствительность системы определяется разностью двух ИП: состояния системы и состояния ее среды. Первое слагаемое сопоставляется с ГК1, второе - с ГК2 с учетом поправочного коэффициента  $\alpha$ .

Согласно уравнениям (3) и (4) относительное состояние системы  $\Delta y$  и ее относительная чувствительность  $\Delta f$  совпадают при равенстве средовых показателей

$$\sum_i a_{0i} x_i = \sum_i a_i x_{0i}, \quad \text{или}$$

$$\sum_i a_{0i} x_i = \sum_i \frac{\partial y}{\partial x_i} x_i. \quad (5)$$

Первый интеграл этого дифференциального уравнения при  $\sum_i a_{0i} x_i \neq 0$ :

$$C = y - \sum_i a_{0i} x_i = y(x_0) - \sum_i a_{0i} x_{0i} = f(a_0) - \text{постоянная, индивидуальная для системы } y(x),$$

величина ее чувствительности к влиянию окружающей среды в норме  $f(a_0)$ , отклонение от которой равно разности двух ИП (4), соответствующих в данном случае первой и второй ГК.

Последовательность процедур обработки исходных данных представлена на рис.1.



**Рис. 1.** Последовательность обработки информации для решения задач интегрального картографирования

**2. Объект и методы исследования.** Исследуется и картографируется территория Слюдянского муниципального района Иркутской области, характеризующаяся уникальной природной обстановкой и сложной экологической и социально-экономической ситуацией [2]. Для расчета ИП по описанной методике были использованы материалы лесоустройства Слюдянского лесхоза Иркутской области 1985 г. с изменениями на 01.01.1998 г. (карты М 1:50000). Каждый объект базы данных лесной таксации характеризуется более чем 200 атрибутами. Путем проверки показателей на коррелированность с целью исключения дублирования информации на уровне выше по абсолютному значению 0,8 из 200 выбрано 27 наиболее информативных показателей состояния лесного фонда. При расчетах использовались алгоритмы МГК и классификации по методу К-средних, реализованные в программе статистической обработки R [3]. Результаты вычислений визуализируются в виде картограмм территории, ареалы которых окрашены в соответствии с величиной ИП в границах лесотаксационных выделов<sup>1</sup>, представляющих разные переменные состояния природных систем и их среды.

Важным этапом в процедурах обработки данных является определение коэффициента  $\alpha$  зависимости  $y_1 = \alpha y_2 + \Delta y$ . С этой целью анализировалась регрессионная зависимость  $y_1(y_2)$

<sup>1</sup> При таксации лесов это первичная лесохозяйственная учетная единица в границах лесного квартала, ограниченный лесной участок, относительно однородный по таксационным показателям, изменчивость которых не превышает нормативных допусков и обуславливает проведение на всей его площади одних и тех же мероприятий по использованию, охране, защите и воспроизводству лесов.

для группы из 10 соседних точек. При определении среднего значения  $\alpha_{cp}$  учитывались значения  $\alpha$  с корреляцией  $R > 0,9$ . Затем рассчитывался потенциал изменчивости  $\Delta y = y_1 - \alpha_{cp} y_2$  для всего массива данных ГК1 и ГК2. Далее значение  $\alpha_{cp}$  корректировалось так, чтобы корреляция  $\Delta y$  и ГК2 была близка к  $R \approx 0$  – исключалось влияние среднего фона на изменчивость состояния системы  $\Delta y$ . Расчеты дают значение  $\alpha_{cp} \approx 1,0$ .

**3. Результаты.** По итогам реализации МГК значения ГК1 учитывают 32,0% вариации, ГК2 – 9,8%, ГК3 – 6,3% и т.д. По коэффициентам преобразований  $a_{ij}$  (ротации координат исходных показателей) в формуле (1) значения ГК1 по каждому лесотаксационному выделу положительно определяются показателями состояния природных систем, включая характеристики рельефа, почвы, структуры растительного покрова и параметрами древостоя. Средовые значения ГК2 отрицательно зависят от показателей бонитета<sup>2</sup> и группы типов леса, экспозиции и крутизны склонов, полноты и однородности породного состава древостоев, положительно – от условий под пологом леса. Индексы бонитета и группы типов леса возрастают по мере ухудшения качества среды, поэтому отрицательное значение  $a_{ij}$  в этих случаях указывает на улучшение средовых показателей.

На основе базы пространственных данных лесоустройства создаются интегральные карты систем по показателю их состояния (ГК1), карты географической среды (ГК2) и карты потенциала изменчивости ( $\Delta y = D = \text{ГК1} - \text{ГК2}$ ) (рис. 2). Интегральная карта географической среды должна отражать инвариантную структуру участков территории, а потенциал изменчивости – их текущее переменное состояние. Наблюдаемая коррелированность ГК1 и  $D$  ( $R = 0,87$ ) говорит об относительном постоянстве величины ГК2, изменяющейся в основном в интервале  $\pm 4$ .

Значения с  $\text{ГК2} = \pm 2$  соответствуют территориальной норме состояния географической среды, в которой формируются пояс горно-таежной кедровой и лиственничной тайги на склонах разной экспозиции [5]. Отрицательные отклонения  $D$  от нормы выделяют высокогорные гольцовые и подгольцовые геосистемы на крутых склонах, положительные – на плакорах<sup>3</sup> и пологих склонах (см. рис.). С ростом значения ГК2 повышается неоднородность состава древесной растительности, доля в запасе темнохвойных пород, размер стволов и улучшается бонитет.

Наличие независимых переменных ГК позволяет решать задачи классификации геосистем по методу К-средних с созданием типологической карты с привлечением всех ГК. Привлечение к расчетам остальных ГК (ГК3, ГК4 и т.д.) позволяет дать более подробную типизацию выделов и построить соответствующую интегральную карту дифференциации территории.

В целом интегральные карты типизации геосистем, построенные по МГК на базе пространственно-распределенных данных, отличается мозаичностью, поскольку принимает во внимание не только неоднородность условий, но и переменные состояния геосистем, находящиеся на стадии естественного восстановления и адаптации к трансформирующемуся зональному фону.

<sup>2</sup> Одна из основных таксационных характеристик лесного насаждения, указывающая на его потенциальную продуктивность и скорость роста деревьев, выражается индексами, наименьшее значение которых соответствует лучшим условиям роста.

<sup>3</sup> Приводораздельные пологие участки ландшафтов, по своим характеристикам наиболее близкие к геосистемам зональной нормы на равнинах.

СЛЮДЯНКА



Рис. 2. Фрагмент интегральной карты потенциала изменчивости геосистем Слюдянского муниципального района.

**Заключение.** Интегральные показатели исчисляются как величины, соотносительные к средовой норме (условиям) существования природных систем и их относительной чувствительности к изменению факторов этой среды. Использование метода главных компонент обеспечивает возможность анализа этих закономерностей для исследования многообразия показателей состояния систем, что позволяет объективизировать расчет интегральных показателей и использовать их в дальнейших вычислениях для решения специальных задач. В данном случае набор исходных признаков преобразуется в пространство независимых координат – интегральных показателей, главных компонент. Первый ГК1 несет основную информацию о геосистеме, второй ГК2 – информацию о ее среде. Их разница  $D$  указывает на величину потенциала изменчивости, так что состояние геосистемы складывается из устойчивого состояния ее среды и этого пространственно варьирующего потенциала. Вычисление этих и аналогичных им интегральных показателей нацелено на создание интегральных карт разного тематического содержания, отражающих как пространственную неоднородность геосистемных оценок, так и распределение типов природных систем по территории.

Расчет разницы  $D$  позволяет найти средонезависимый интегральный показатель, на основе которого вычисляются различные оценочные функции, например, риски природопользования, с последующим картографическим отображением результатов. Такая работа подразумевает наличие объемных по числу объектов и атрибутов баз географической информации и теоретических моделей, поскольку результаты счета должны существенно зависеть от полноты набора исходных пространственных данных и знаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. М.: Из-во Стандартов. 1973. 172 с.
  2. Геоинформационная система управления территорией / Черкашин А.К. (ред.). Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН. 2002. 151 с.
  3. Зарядов И.С. Введение в статистический пакет R: типы переменных, структуры данных, чтение и запись информации, графики. М.: Изд-во РУДН. 2010. 207 с.
  4. Квалиметрия: методы количественного оценивания качества различных объектов / Астратова Г.В. (ред.). Сургут: РИО СурГПУ. 2014. 160 с.
  5. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта м-ба 1:1 500 000. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совмине СССР. 1977.
  6. Сошникова Л.А., Тамашевич В.Н. Многомерный статистический анализ в экономике. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 1999. 598 с.
  7. Черкашин А.К., Лещенко Я.А., Боева А.В. Динамические и квалиметрические модели оценки качества жизни семьи// Народо население. 2015. № 3. С. 67-82.
  8. Черкашин А.К., Мядзелец А.В. Восстановление нелинейной зависимости качества жизни населения от социально-экономического потенциала регионов Сибири// География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 149-160.
- 

UDK 910.1:528.94:51-7

**STATISTICAL TECHNOLOGY OF INTEGRAL MAPS CREATION ON THE DATABASE OF THE TERRITORY THE MUNICIPAL DISTRICT**

**Alexander K. Cherkashin**

Dr., Professor, Head. Laboratory "Theoretical geography", e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Svetlana I. Lesnykh**

Ph.D., Higher Senior Officer Laboratory "Theoretical geography", e-mail: [tyara@irigs.irk.ru](mailto:tyara@irigs.irk.ru)

V.B. Sochava Institute of Geography of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
1, Ulan-Bator Str., 664033, Irkutsk, Russia,

**Abstract.** The methods of calculations on integral indicators of the environment states are developed. Its combine different spatial information on the geographical situation in the light of scientific rules of qualimetry. The objectivity of integral indicator calculation is provided by application of principal components method taking into account these rules. The first principal component reflects the maximum variation of geosystem information, and the second one describes the steady environmental background. Their difference for each location assesses the geosystem variability potential. Received integral indicators are displayed on assessment cartograms. The database of Sludianka forestry management in borders of Sludianka municipal district of the Irkutsk region is used for computation.

**Keywords:** integral indicators and maps, method of calculation the integral indicators, integral thematic mapping, municipal district.

### References

1. Azgaldov G.G., Raykhman E.P. O kvalimetrii [About a kvalimetriya]. Moscow. Standards Publ. 1973. 172 p. (in Russian).
2. Geoinformatzionnaya sistema upravleniya territoriey [Geographic information system of territorial management] / Cherkashin A.K. (editor). Irkutsk: Publishing house of Institute of geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science. 2002. 151 p. (in Russian).
3. Zaryadov I.S. Vvedenie v statisticheskiy paket R: tipy peremennykh, struktury dannykh, chtenie i zapis informazii, grafiki [Introduction in a statistical package of R: variables type, structures of data, reading and data recording, schedules]. Moscow. RUDN Publ. 2010. 207 p. (in Russian).
4. Kvalimetriya: metody kolichestvennogo ozenivaniya kachestva razlichnykh obectov [Kvalimetriya: methods of quantitative estimation of quality of various objects] / Astratova G.V. (editor). Surgut. RIO to SurGPU. 2014. 160 p. (in Russian).
5. Landshafty yuga Vostochnoj Sibiri. Karta m-ba 1:1 500 000 [Landscapes of the South of Eastern Siberia. The card of scale 1:1 500 000]. Moscow. Head department of geodesy and cartography under the Council of ministers of the USSR. 1977. (in Russian).
6. Soshnikova L.A., Tamashevich V.N. Mnogomertyy statisticheskiy analiz v ekonomike [The multivariate statistical analysis in economy]. Moscow. UNITY-DANA Publ. 1999. 598 p. (in Russian).
7. Cherkashin A.K., Leshchenko Ya.A., Boeva A.V. Dinamicheskie i kvalimetricheskie modeli ozenki kachestva zhizni sem'i [Dynamic and qualimetrical models of a life quality evaluation in a family]. Population. 2015. No. 3. Pp. 67-82. (in Russian).
8. Cherkashin A.K., Myadzelets A.V. Vosstanovlenie nelineynoy zavisimosti kachestva zhizni naseleniya ot sozialno-ekonomicheskogo potentsiala regionov Sibiri [Reconstructing a nonlinear dependence of the quality of life on the socioeconomic potential of Siberia's regions]. Geography and natural resources. 2014. No. 2. Pp. 149-160. (in Russian).

### Правила приема статей в журнал

Начиная с 2016 г., труды конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении» издаются как одноименное периодическое издание (научный журнал, которому присвоен международный индекс ISSN), 4 раза в год (январь, март, июль, октябрь). Оргкомитетом конференции заключен лицензионный договор с E-library. Начиная с 2016 г., с авторами заключаются авторские соглашения, полные тексты статей помещаются в E-library с индексацией в РИНЦ.

Тематика журнала совпадает с тематикой конференции:

1. Теоретические и методологические аспекты информационных и математических технологий.
2. Математическое моделирование в научных исследованиях, вычислительная математика, оптимизация.
3. Методы, технологии и инструментальные средства создания интеллектуальных энергетических систем.
4. Методы и системы искусственного интеллекта, интеллектуальные вычисления.
5. Ситуационное управление, системы интеллектуальной поддержки принятия решений в управлении, ситуационные центры.
6. Информационное и семантическое моделирование, семантические вычисления.
7. Корпоративные информационные, геоинформационные, интеллектуальные системы.
8. Параллельные, распределенные, агентные и облачные вычисления.
9. Кибербезопасность (защита информационных систем критически важных инфраструктур).

Статьи участников, приславших свои статьи к 20 февраля и/или 25 марта, публикуются до начала конференции. Статьи участников конференции, присланные к 25 июня (или привезенные с собой на конференцию), публикуются после конференции (в текущем году). Статьи, присланные к 25 сентября, публикуются в следующем (2017) году. Предусматриваются как очное, так и заочное участие в конференции (только публикация, с частичной оплатой оргвзноса), но при большом количестве статей предпочтение будет отдаваться очным участникам (статьи заочных участников могут быть перенесены в следующий выпуск).

Для публикации статьи необходимо подписать авторское соглашение во время регистрации на сайте (подтвердить согласие на публикацию статьи в журнале и размещение полного текста статьи в E-Library). Статьи заочных участников, не зарегистрированных на сайте, могут быть приняты при наличии авторского соглашения (твердая копия или скан-копия).

С 2016 г. вводится более строгое рецензирование статей. При рецензировании статей обращается внимание на соответствие тематике журнала, научный уровень работы, ссылки на предшествующие работы (желательно не менее 11-15 ссылок), соответствие требованиям к оформлению статей. Для оценки научного уровня работы рекомендуется в заключении статьи выделять новизну и оригинальность методов и/или результатов. Для аспирантов, студентов, магистрантов требуется рекомендация (или соавторство) руководителя.

Требования к оформлению статей по сравнению с предыдущими годами изменены и приводятся в отдельных файлах (требования и шаблон статьи) на сайте конференции <http://imt.isem.irk.ru>. По возникающим вопросам можно обращаться в Оргкомитет конференции e-mail: [imt@isem.irk.ru](mailto:imt@isem.irk.ru)