



Том 2

Том 2

# МОЛОДЁЖЬ И НАУКА

Материалы X Всероссийской  
научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых,  
посвященной 80-летию образования  
Красноярского края

## МОЛОДЕЖЬ И НАУКА

Материалы X Всероссийской  
научно-технической конференции  
студентов, аспирантов  
и молодых ученых,  
посвященной 80-летию  
образования  
Красноярского края

ISBN 9785763831030 (2 том)



ISBN 9785763831016



МОЛОДЕЖЬ И НАУКА

Том 2



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

## **МОЛОДЕЖЬ И НАУКА**

**Материалы X Всероссийской  
научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых**

В трех томах

Том 2

Красноярск  
СФУ  
2014

УДК 001.591(063)  
ББК 72я431  
М754

М754 **Молодежь** и наука: в 3 т.: материалы конф. Т. 2 / отв. за выпуск  
А. Н. Тамаровская. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 280 с.

ISBN 978-5-7638-3101-6  
ISBN 978-5-7638-3103-0 (Т. 2)

*Сборник материалов X Всероссийской с международным участием научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодёжь и наука», посвященной 80-летию образования Красноярского края, включает три тома: технические, естественные и гуманитарные науки. Ключевая цель ежегодной конференции – это развитие научно-технического творчества молодежи, привлечение её к исследовательской деятельности в науке, формирование творческих связей с российскими и зарубежными научно-исследовательскими коллективами. Сборник материалов отражает результаты научных исследований, проведенных молодыми представителями различных школ и направлений современной науки.*

*Выпуск сборника поддержан за счет средств, представленных Краевым государственным автономным учреждением «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности», путем выделения целевого финансирования.*

*Ответственным организатором конференции является Научно-образовательный центр молодых ученых Сибирского федерального университета. Издание предназначено для студентов различных направлений и специальностей, магистрантов, научных работников, преподавателей и аспирантов. Ответственность за публикуемые материалы несут авторы научных статей.*

УДК 001.591(063)  
ББК 72я431

ISBN 978-5-7638-3101-6  
ISBN 978-5-7638-3103-0 (Т. 2)

© Сибирский  
федеральный  
университет, 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ХИМИИ .....</b>	<b>9</b>
М.В. Кравченко СУЛЬФАТИРОВАНИЕ АЛЛОБЕТУЛИНА ХЛОРСУЛЬФОНОВОЙ КИСЛОТОЙ В ДИОКСАНЕ И N,N-ДИМЕТИЛФОРМАМИДЕ .....	9
Н.С. Мох ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРГАНЦА В ВИНАХ МЕТОДОМ ИНВЕРСИОННОЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИИ .....	11
К.М. Николаева КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НАНОЛЕНТ C <sub>3</sub> N И C <sub>5</sub> N .....	13
<b>БИОТЕХНОЛОГИЯ .....</b>	<b>17</b>
Е.Е. Башмакова ОДНОВРЕМЕННОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ЧЕТЫРЁХ КЛИНИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ПОЛИМОРФИЗМОВ ПЛАЗМЕННОГО ГЕМОСТАЗА БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ ТВЕРДОФАЗНЫМ МИКРОАНАЛИЗОМ .....	17
М.Д. Ларионова ПОЛУЧЕНИЕ ЛЮЦИФЕРАЗЫ ИЗ METRIDIA LONGA ПРИ ЭКСПРЕССИИ В SF9- КЛЕТКАХ .....	20
М.А. Шендрик ГИБРИДНЫЙ БЕЛОК МИНИАНТИТЕЛО-ЛЮЦИФЕРАЗА <i>Renilla</i> : ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ РЕПОРТЁРА ДЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ИММУНОАНАЛИЗА .....	22
<b>БИОФИЗИКА.....</b>	<b>27</b>
Е.М. Байгина ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО БИФЕРМЕНТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ .....	27
М.А. Кириллова БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ФЕРМЕНТАТИВНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРОБНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ...	31
О.О. Лащук СЕЛЕКТИВНОЕ ТУШЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЛЮЦИФЕРАЗЫ <i>PHOTOBACTERIUM LEIOGNATHI</i> .....	34
<b>ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ .....</b>	<b>39</b>
М.Г. Герасимчук РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ, ТРЕНАЖЕРА-ЭМУЛЯТОРА, ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ.....	39
А.С. Правитель ОДНОКРИСТАЛЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	41
И.А. Якимов АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НА НЕБЕЗОПАСНЫХ ЯЗЫКАХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЯЗЫКА C) .....	45



<b>ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ .....</b>	<b>50</b>
А.В. Бураченко ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ПРИЧИНЫ РАЗНООБРАЗИЯ ЯШМ .....	50
Б.М. Лобастов, В.А. Бумагин КОЛЛЕКЦИЯ МЕТЕОРИТОВ НАШЕГО ИНСТИТУТА .....	53
С.А. Сильянов ОБЗОР КРИОМИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПЕЩЕР .....	57
<b>ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ .....</b>	<b>59</b>
Г.В. Белоконов ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА РОССЫПНОГО ЗОЛОТА БАСЕЙНА РЕКИ ГОЛЫШЕВА (О. БОЛЬШЕВИК, АРХ. СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ) .....	59
П.А. Казоба, А.С. Филиппов ГЕОЛОГИЯ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД УЧАСТКА «ЗАДОРНЫЙ» (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧУКОТКА) ..	61
В.А. Соколов, В.И. Наидко ПРИМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАРТИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ СОВЕТСКО-ПЕРЕВАЛЬНИНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ) .....	64
<b>ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ .....</b>	<b>67</b>
С.С. Налобина ИЗВЕСТКОВЫЕ СКАРНЫ АЛЕКСЕЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНАЯ ХАКАСИЯ) .....	67
С.А. Сильянов ХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ГРАНАТОВ – ПОКАЗАТЕЛЬ УСЛОВИЙ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ .....	70
О.М. Карнаухова МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ НИКОЛАЕВСКОЙ СОПКИ (ОКРЕСТНОСТИ Г. КРАСНОЯРСКА) .....	74
<b>МАТЕМАТИКА ИНФОРМАТИКА .....</b>	<b>77</b>
<i>1. АЛГЕБРА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЛОГИКА И ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИКА .....</i>	<i>77</i>
Е.А. Кравцова МАКСИМАЛЬНЫЕ КОММУТАТИВНЫЕ ИДЕАЛЫ ПОДАЛГЕБРЫ $NF(K)$ АЛГЕБР ЛИ ТИПА $F_4$ .....	77
С.К. Куклина, А.О. Лихачёва ПРИМЕРЫ НЕЗАМКНУТЫХ КОВРОВ АДДИТИВНЫХ ПОДГРУПП .....	78
Н.Е. Чёрная ГЕРОНОВЫ И ТИАНОВЫ ТРЕУГОЛЬНИКИ .....	80
<i>2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ .....</i>	<i>83</i>
А.В. Рубанова, Т.М. Мацкевич АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДОПУСТИМОСТИ ПРАВИЛ ВЫВОДА В МОДАЛЬНЫХ ЛОГИКАХ $GL$ И ОБНОГО РАСШИРЕНИЯ $K4$ .....	92
<i>3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ .....</i>	<i>94</i>
А.В. Родионова УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНОГО ТЕЧЕНИЯ С ИСПАРЕНИЕМ ОТНОСИТЕЛЬНО ДЛИННОВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ .....	94
И.А. Шефер ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ В МОДЕЛИ МИКРОКОНВЕКЦИИ .....	98

К.Ю. Атургашева ТРЕХМЕРНАЯ КВАЗИСТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ПОЛОГО БЕСКОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА В НАПРЯЖЕНИЯХ .....	101
<b>4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	106
Р.П. Магденко ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ДВИЖУЩИХСЯ ВИЗУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ .....	107
А.В. Огородникова РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО КУРСУ ИНФОРМАТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ НЕМАТЕМАТИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ .....	109
<b>5. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ ФУНКЦИЙ</b> .....	116
А.С. Пейчева ОБ ОДНОЙ НЕКОЭРЦИТИВНОЙ ЗАДАЧЕ ШТУРМА – ЛИУВИЛЛЯ ДЛЯ ОПЕРАТОРА ЛАМЕ .....	116
А.А. Яковлев ОБ ОБОБЩЕНИИ ТЕОРЕМЫ ХЁРМАНДЕРА ДЛЯ ЗАДАЧИ КОШИ – ГУРСА .....	122
А.С. Керп О ВЛОЖЕНИИ ДВУМЕРНЫХ ТОРОВ И ПРИМЕНЕНИИ К КВАНТОВЫМ КОМПЬЮТЕРАМ .....	123
<b>5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ</b> .....	126
А.А. Коромыслова ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КЛАССИФИКАЦИИ .....	126
А.В. Дягель ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ .....	130
Д.В. Федотов МЕТОД ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ .....	135
<b>6. ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА И ФИНАНСОВО-АКТУАРНАЯ МАТЕМАТИКА</b> .....	138
Р.Е. Илларионов АЛГОРИТМЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ ЗАДАЧИ О НАИБОЛЬШЕЙ КЛИКЕ ГРАФА .....	138
М.М. Додонова ИЗУЧЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОСТАНОВОК ЗАДАЧИ О РЮКЗАКЕ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ .....	140
А.И. Иванова ЭВЕНТОЛОГИЧЕСКАЯ РЕГРЕССИЯ СЛУЧАЙНЫХ МНОЖЕСТВ СОБЫТИЙ В ВИДЕ СЕТ-СРЕДНИХ .....	144
<b>МЕДИЦИНСКАЯ БИОЛОГИЯ</b> .....	148
Е.В. Алымова ВЛИЯНИЕ ЦИТОФЛАВИНА НА ПРО/АНТИОКСИДАНТНУЮ СИСТЕМЫ В ЭРИТРОЦИТАХ БОЛЬНЫХ ЭХИНОКОККОЗОМ .....	148
Я.И. Перепечай ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ЧАСТИЧНЫХ МИКРОДЕЛЕЦИЙ <i>AZFc</i> -ЛОКУСА Y-ХРОМОСОМЫ В ПОПУЛЯЦИИ МУЖЧИН ГОРОДА КЕМЕРОВО .....	151
Н.М. Маркелова, А.А. Шуилова, А.П. Зуев, Е.С. Черепанова ПРИМЕНЕНИЕ БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ КОСТНЫХ ПОЛОСТЕЙ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ОСТЕОМИЕЛИТЕ .....	154

<b>НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>158</b>
А.Е. Афанасьева, Н.В. Жарикова МОДИФИЦИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМОРАСПАДЕ АЦЕТИЛАЦЕТОНАТОВ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ .....	158
Е.Ю. Государева ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА КОАГУЛЯЦИЮ ГИДРОЗОЛЕЙ НАНОАЛМАЗОВ .....	161
С.А. Киселева АГРЕГАТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЗОЛЕЙ НАНОАЛМАЗОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КАТИОНАМИ ХРОМА.....	164
И.А. Маркевич МОДИФИЦИРОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ .....	166
Е.И. Мельникова, А.Л. Колоненко, Г.А. Глушенко, И.В. Осипова ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МАГНИЯ В ВЧ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ВОДОРОДОСОРБЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	169
М.С. Сметанина, А.С. Лобасов ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЯЗКОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ.....	174
<b>ОТКРЫТАЯ ФИЗИКА .....</b>	<b>178</b>
А.Д. Козьмин, В.А. Григорьева, А.О. Щурин РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МАСС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ГЛИНЫ ПЕРВОМАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	178
Е.К. Бокова ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЛАМП.....	183
<b>СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>188</b>
Н.Р. Антропов КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ .....	188
О.В. Брюханов РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К ВЕДЕНИЮ ПРОЕКТА, ОСНОВАННОГО НА КОМБИНАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОЛОГИЙ .....	192
О.В. Дрозд РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБМЕНА ЗАКРЫТОЙ ДОКУМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ПО ПРОМЫШЛЕННЫМ СЕТЯМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ .....	196
<b>ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА.....</b>	<b>200</b>
А.А. Дорошенко ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КЕРАМИЧЕСКОМ СЫРЬЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.....	200
В.И. Кузьмин ПОВЕРХНОСТЬ ФЕРМИ ЭЛЕКТРОННОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В РАМКАХ КЛАСТЕРНОЙ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ВЕСОМ .....	204
Н.Н. Тачеева ВЕДУЩИЙ СТРУКТУРНЫЙ ПАРАМЕТР И ПРОГНОЗ СИНТЕЗА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ РЯДА ДВОЙНЫХ МОЛИБДАТОВ $Al_n(MoO_4)_2$ . ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ $\beta$ -ФАЗЫ $RbSm(MoO_4)_2$ .....	208

<b>ФИЗИКА.....</b>	<b>212</b>
М.А. Атрохова СВЕРХПЛОТНЫЕ ЗВЕЗДЫ И ТЯЖЕЛЫЕ ЛЕПТОНЫ.....	212
Б.М. Лобастов КАК СКОНСТРУИРОВАТЬ ПРОСТЕЙШИЙ ПОЛЯРИСКОП.....	216
С.И. Полукеев ДИНАМИКА РЕЛЯТИВИСТСКОЙ СФЕРЫ С ОДНОРОДНЫМ ДАВЛЕНИЕМ.....	220
<b>ХИМИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ, ГОРНОМ ДЕЛЕ И ГЕОЛОГИИ .....</b>	<b>223</b>
А.А. Фитисенко, М.А. Воронина ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОМАРГАНЦЕВЫХ СПЛАВОВ.....	223
С.С. Лепин ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДОВ СВИНЦА В РЕАКЦИЯХ С АЛЮМИНИЕВЫМ АНОДОМ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.....	228
С.А. Дружинин, А.В. Ковальчук, К.А. Куличкова ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ С СУЛЬФАМИНОВОЙ КИСЛОТОЙ.....	233
Б.О. Аполлонов, А.А. Шемякова, Н.М. Рукосуева НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ СОЛЕЙ В ГЛИНИСТОМ СЫРЬЕ .....	235
Н.Ю. Лунева ВНУТРИПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ (НА ПРИМЕРЕ БЕРЕЗОВОЙ РОЩИ СТУДЕНЧЕСКОГО ГОРОДКА).....	239
Р.И. Московкина, Т.Д. Бережная ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	243
<b>ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ.....</b>	<b>245</b>
Т.Е. Бочарова ЦЕЛЛЮЛОЗОРАЗЛАГАЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ В ПИХТАРНИКАХ, ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРОЕДОМ ( <i>Polygraphus proximus</i> Blandford).....	245
А.А. Глекнер ОЧИСТКА ПОЧВ ОТ МЕДИ ПРИ ПОМОЩИ ОСОКИ БОЛЬШЕХВОСТОЙ .....	248
О.О. Телешева ПОЧВЕННО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАПОВЕДНИКА «СТОЛБЫ» .....	251
<b>ЭКОЛОГИЯ .....</b>	<b>254</b>
Е.А. Чернявский ФАУНА СЛЕПНЕЙ (DIPTERA, TABANIDAE) ЗЕЙСКОГО ЗАПОВЕДНИКА .....	254
Н.В. Михайлова ДОННЫЕ БЕСПОЗВОНОЧНЫЕ ОЙСКОГО, КАРОВОГО, РАДУЖНОГО ОЗЕР ГОРНОГО ХРЕБТА ЕРГАКИ (ЗАПАДНЫЙ САЯН).....	259
Н.О. Яблоков, Ю.Ю. Яковлев ПИТАНИЕ РОТАНА-ГОЛОВЕШКИ <i>PERCCOTTUS GLENII</i> DYBOWSKI, 1877 В ПРУДУ БУГАЧ (БАССЕЙН СРЕДНЕГО ЕНИСЕЯ) .....	263

<b>ЭКОЛОГО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ.....</b>	<b>267</b>
---	------------

М.М. Иванов, О.А. Хропот

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИТАМИННОГО СОСТАВА ПЛОДОВ ТЫКВЫ РАЗНЫХ СОРТОВ.....	267
--	-----

И.В. Свобода

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВИНЦА НА РАСТЕНИЕ ГОРОХ РАСТИТЕЛЬНЫЙ <i>PISUM SATIVUM</i> .....	271
---	-----

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ХИМИИ

## СУЛЬФАТИРОВАНИЕ АЛЛОБЕТУЛИНА ХЛОРСУЛЬФОНОВОЙ КИСЛОТОЙ В ДИОКСАНЕ И N,N-ДИМЕТИЛФОРМАМИДЕ

М.В. Кравченко

Научный руководитель В.А. Левданский

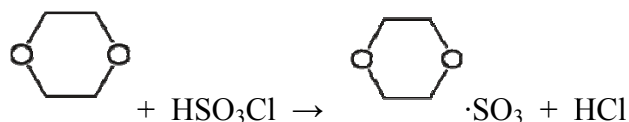
*Институт химии и химической технологии СО РАН*

Соединениями, сочетающими доступность с ценной биологической активностью богат класс тритерпеноидов [1]. Наиболее доступным и изученным представителем этого класса соединений является бетулин. Наличие в бетулине гидроксильных групп и двойной связи в изопропенильной группе позволяет осуществлять его разнообразную химическую модификацию, в частности, бетулин способен изомеризоваться в аллобетулин (19 $\beta$ ,28-эпоксioлеан-3-ол) – соединение со скелетом олеанона [2].

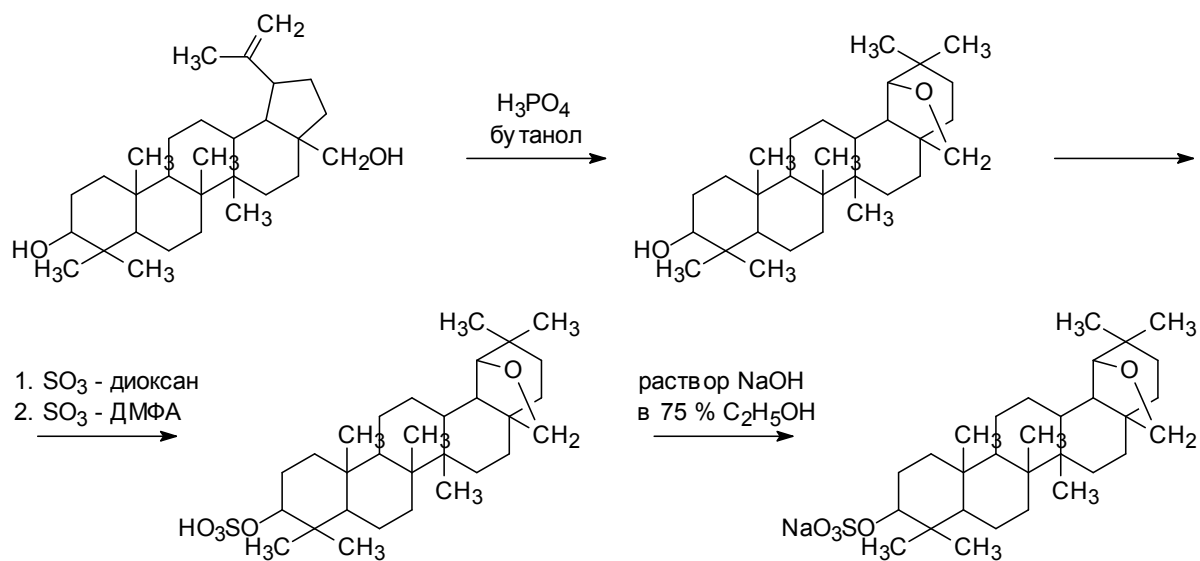
На основе бетулина и аллобетулина синтезирована большая группа биологически активных веществ. Однако очень низкая растворимость бетулина, аллобетулина и их производных в воде затрудняет их практическое использование и изучение биологической активности. Простой способ придания водорастворимости бетулину и его производным это их сульфатирование с получением соответствующих сульфатов. Известно, что сернокислотные эфиры тритерпеноидов – бетулина, бетулиновой и олеановой кислот проявляют высокую биологическую активность, являются ингибиторами комплимента [3].

В настоящей работе с целью расширения ассортимента сульфатированных тритерпеновых производных, впервые синтезирован 3-сульфат аллобетулина. Аллобетулин сульфатировали комплексами SO<sub>3</sub>-диоксан и SO<sub>3</sub>-диметилформамид, предварительно полученными при взаимодействии хлорсульфоновой кислоты соответственно с 1,4-диоксаном и N,N-диметилформамидом.

Впервые предложено проводить сульфатирование аллобетулина хлорсульфоновой кислотой в 1,4-диоксане или N,N-диметилформамиде. При взаимодействии хлорсульфоновой кислоты с диоксаном или диметилформамидом образуется соответственно комплекс SO<sub>3</sub> – диоксан или SO<sub>3</sub> – диметилформамид и выделяется HCl [4]:



Изомеризация бетулина в аллобетулин проведена в бутаноле в присутствии ортофосфорной кислоты. Сульфатирование аллобетулина осуществлено хлорсульфоновой кислотой в 1,4-диоксане и N,N-диметилформамиде. 3-Сульфат аллобетулина выделяют в виде натриевой или калиевой соли:



Состав натриевой соли 3-сульфата аллобетулина ( $\text{C}_{30}\text{H}_{49}\text{O}_5\text{SNa}$ ) и калиевой соли аллобетулина ( $\text{C}_{30}\text{H}_{49}\text{O}_5\text{SK}$ ) подтвержден элементным анализом, строение ИК и ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектрами. В ИК спектре 3-сульфата аллобетулина в отличие от ИК-спектра аллобетулина присутствуют полосы поглощения в области  $830\text{ см}^{-1}$  (SO) и интенсивная полоса при  $1245\text{--}1255\text{ см}^{-1}$  ( $\text{SO}_2$ ), которые подтверждают наличие сульфатной группы в молекуле 3-сульфата аллобетулина.

Сравнительный анализ ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектров исходного аллобетулина и 3-сульфата аллобетулина показал, что у аллобетулина химический сдвиг у вторичного атома углерода C3, связанного с гидроксильной группой наблюдается при 78,99 м.д., а после замещения гидроксильной группы на сульфатную, химический сдвиг атома углерода C3 смещается в слабое поле к 86,16 м.д. Полученные результаты согласуются с данными приведенными в работе [5]. Отсутствие сигнала в ЯМР  $^{13}\text{C}$  спектре 3-сульфата аллобетулина атома углерода C3 в области 78,99 м.д. указывает на полное замещение гидроксильной группы на сульфатную группу.

### Вывод

Показано, что сульфатирование аллобетулина комплексов  $\text{SO}_3$  – диоксан в 1,4-диоксане или  $\text{SO}_3$  – диметилформамид в N,N-диметилформамиде при температуре  $40\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$  протекает за 4-5 часов и приводит к образованию 3-сульфата аллобетулина. 3-Сульфат аллобетулина получен в виде натриевой и калиевой соли.

### Список литературы

1. Толстиков Г.А., Флехтер О.Б., Шульц Э.Э., Балтина Л.А., Толстиков А.Г. Бетулин и его производные. Химия и биологическая активность // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. № 13. С. 1–30.
3. Патент 2243233 (РФ). Производные бетулина как ингибиторы комплемента / А.П. Каплун, Ю.Э. Андия-Правдивый, С.В. Бурева, Л.В. Козлов, В.И. Швец // Оpubл. 27.12.2004.

4. Джильберт Э.Е. Сульфирование органических соединений. М.: Химия, 1969. 415 с.

5. Одинокова Л.Э., Ошиток Г.И., Денисенко В.А., Ануфриев В.Ф., Толкач А.М., Уварова Н.И. Гликозилирование бетулина и его ацетатов в присутствии карбоната кадмия // Химия природных соединений. 1984. № 2. С. 182–187.

УДК 543.55.054.1:546.711

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРГАНЦА В ВИНАХ МЕТОДОМ ИНВЕРСИОННОЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИИ**

**Н.С. Мох**

**Научный руководитель д-р хим. наук Г.В. Бурмакина**

*Сибирский федеральный университет*

Вино имеет исключительно сложный химический состав, насчитывающий более 600 органических и неорганических соединений, в том числе марганец. От содержания соединений марганца зависят характер брожения и формирование качества вина, а также его гармоничность и развитие букета [1]. Марганец принимает участие в окислительно-восстановительных процессах при созревании вина. Его концентрация влияет на вкус и другие характеристики готового продукта. Марганец способствует формированию ацетальдегида, а железо катализирует связывание ацетальдегида с фенольными соединениями, что снижает качество вина [2, 3]. Соединения марганца необходимы для правильного пищеварения, размножения, функционирования нервной системы человека, однако его избыток оказывает отрицательное влияние на нервную систему, поражает почки, легкие и печень. В связи с вышесказанным необходимо анализировать вина на содержание марганца.

Для определения марганца в различных объектах (в водах, почвах, рудах и сплавах) используются различные физико-химические методы, включенные в ГОСТ [3, 4], МУК 4.1.1516-03, в том числе и вольтамперометрические. Однако, методика определения марганца в винах методом вольтамперометрии в настоящее время отсутствует.

Вольтамперометрические методы исследования и анализа основаны на изучении зависимости силы тока в электролитической ячейке от потенциала индикаторного (рабочего) электрода, погруженного в анализируемый раствор, на котором реагирует исследуемое электрохимически активное вещество. Вместе с индикаторным электродом в ячейку помещают вспомогательный электрод со значительно большей поверхностью, чтобы при прохождении тока его потенциал практически не менялся. Значение потенциала измеряют относительно электрода сравнения, в качестве которого широко используются насыщенный каломельный (нас.к.э.) или хлорсеребряный электроды.



Одним из вольтамперометрических методов анализа, позволяющих снизить предел обнаружения, является инверсионная вольтамперометрия (ИВА) за счет возможности концентрирования определяемого соединения или элемента на поверхности электрода. Электрохимическое накопление определяемого элемента возможно вследствие образования металла, малорастворимого или комплексного соединения на поверхности индикаторного электрода [5]. Для определения марганца в различных объектах методом ИВА в качестве рабочего электрода чаще всего используют токсичные ртутные электроды.

Поэтому целью работы являлись анализ литературных данных и выбор экспериментальных условий для разработки методики определения марганца в винах на нетоксичных экологически чистых электродах методом инверсионной вольтамперометрии.

На основе литературных данных выбраны условия определения марганца в воде методом инверсионной вольтамперометрии, которые приведены в таблице.

**Таблица.** Условия определения марганца методом ИВА (отн. нас.к.э.)

Соединение марганца	Состав фонового электролита	Рабочий электрод	$E_{1/2}$ , В	Реакция	$\lg K_{уст}$
Образование комплексного соединения					
$Mn^{(II)}$ -тарtrat	2М NaOH, 5% К-Na-тарtrat	Hg	-0,4	$2 \rightarrow 3$	2,9
	1М KOH, 0,3М К-Na-тарtrat	Hg	-0,24	$2 \rightarrow 3$	
$Mn^{(II)}$ -ЭДТА	1М $KNO_3$ , 0,1М ЭДТА	Hg	-0,4	$2 \rightarrow 4$	14,04
$Mn^{(II)}$ -оксалат	0,1М $Na_2C_2O_4$ , 0,1М $C_2H_2O_4$	Hg	-0,4	$2 \rightarrow 3$	3,82
$Mn^{(III)}$ -комплекс	1М NaCl, 4М NaOH, 0,2М $N(CH_2CH_2OH)_3$	Hg	-0,45	$2 \rightarrow 3$	—
	0,2М $NH_4OH$ , 0,2М $NH_4Cl$ , 0,05М тирон	Hg	-0,33	$2 \rightarrow 3$	—
	0,25М NaOH, 0,05М тирон	Hg	-0,39	$2 \rightarrow 3$	—
Образование малорастворимого соединения					
$Mn^{(II)}(OH)_2$	1М $NH_4OH$ , 1М $NH_4Cl$	Hg	-1,65	$2 \rightarrow 0$	—
$Mn^{(II)}(OH)_4$	2М $(NH_4)_2SO_4$ , $H_2SO_4$	Pt	0,75	$2 \rightarrow 4$	—
$Mn(IO_4)_4$	0,02–0,2 М $HNO_3$ , 0,003 М $KIO_3$	Pt	1,3	$2 \rightarrow 4$	—

Представленные в таблице данные приведены для водных растворов марганца. Для определения марганца в винах необходимо оптимизировать экспериментальные условия для водно-спиртовых растворов на нетоксичных электродах.

### Список литературы

1. Кишковский З. Н., Скурихин И. М. Химия вина. М.: Агропромиздат, 1988. 253 с.
2. Cacho J., Castells E., Esteban A., Laguna B., Sagrista N. Iron, Copper, and Manganese Influence on Wine Oxidation. Am. J. Enol. Vitic., Vol. 46, No. 3. 1995. P. 380–384.

3. ГОСТ 4974-72 Вода питьевая. Методы определения содержания марганца. Взамен ГОСТ 4974-49; Введ. 01.01.74. М.: Изд-во стандартов, 1972. 6 с.

4. ГОСТ 16698.1-93 Марганец металлический и марганец азотированный. Метод определения марганца. Взамен ГОСТ 16698.1-71; Введ. 01.07.95. М.: Изд-во стандартов, 1995. 7 с.

5. Будников Г. К. Майстренко В. Н., Вяселев М. Р. Основы современного электрохимического анализа. М.: Мир, 2003. 592 с.

УДК 544.18, 538.91

## **КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НАНОЛЕНТ $C_3N$ И $C_5N$**

**К.М. Николаева**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук А.А. Кузубов**

*Сибирский федеральный университет*

Все цифровые устройства в процессе своего развития имеют тенденцию к миниатюризации, соответственно, ученым приходится искать новые компактные материалы нанoeлектроники. Графеновые наноленты представляют собой вполне подходящий материал для изготовления полевых транзисторов, являющихся стандартными узлами всех микросхем. При этом транзисторы на их основе могут с успехом работать даже при комнатной температуре, в то время как предшествующие разработки функционировали только при низких температурах в силу своей большей толщины. Поскольку свойства графеновых нанолент сильно зависят от их геометрических параметров (толщина, ширина, типы краев *zigzag* или *armchair*), химические и структурные модификации нанолент могут резко изменить их производительность. Одним из наиболее распространенных способов изменения электронных и химических свойств нанолент является допирование такими атомами, как бор и азот в связи с образованием более прочной ковалентной связи по сравнению со связью C-C. К тому же допирование азотом может значительно увеличить проводимость графеновых нанолент, изменить ширину запрещенной зоны. Следовательно, допирование азотом представляется интересным и перспективным с точки зрения управления электронными свойствами материала.

Целью данной работы являлось квантово-химическое исследование энергетической стабильности и электронных свойств нанолент  $C_3N$  и  $C_5N$ .

В настоящей работе исследования осуществлялись с помощью квантово-химического моделирования в программном пакете VASP в рамках метода функционала плотности (DFT) с использованием базиса плоских волн и PAW-формализма. Вычисления проводились с применением обобщенного градиентного

приближения (GGA) – обменно-корреляционного функционала PBE (Perdew – Burke – Ernzerhof) с коррекцией Grimme, учитывающей ванн-дер-ваальсово взаимодействие.

На начальном этапе были оптимизированы гексагональные элементарные ячейки монослоев  $C_3N$  и  $C_5N$  (рис. 1 *a, b*). Для отделения образов плоскостей, находящихся в соседних ячейках, в условиях расчета с периодическими условиями задавался вакуумный промежуток  $10 \text{ \AA}$  вдоль нормали к плоскости. Обратное пространство в первой зоне Брюллюэна автоматически разбивалось на сетку по схеме Монхорста – Пака, количество  $k$ -точек вдоль каждого из направлений составляло  $12 \times 12 \times 1$ . Энергия обрезания плоских волн в расчетах была равна  $400 \text{ эВ}$ .

Далее с помощью элементарных гексагональных ячеек  $C_3N$  и  $C_5N$  были смоделированы наноленты различной толщины двух типов: *armchair* (табл. 1, 2, рис. 2 *a, b* и *zigzag*. При этом были рассмотрены два случая пассивации краев нанолент. В первом случае края были пассивированы полностью ( $H_{CN}$ ), во втором с водородом был связан только углерод ( $H_C$ ). При нахождении оптимальной геометрии нанолент, ввиду одномерности структуры, количество  $k$ -точек вдоль каждого из направлений составляло  $12 \times 1 \times 1$ .

Для сравнения энергетической стабильности расчет энергии образования наноленты проводился по формуле:

$$E = E_{nanoribbon} - n_I \cdot E_{unitcell} - m \cdot E_{H_2} - k \cdot E_{graphene}, \quad (1)$$

где  $E_{nanoribbon}$  – полная энергия наноленты,  $E_{unitcell}$  – энергия элементарной гексагональной ячейки монослоя  $C_3N$  ( $C_5N$ ),  $E_{graphene}$  – энергия элементарной ячейки графена,  $E_{H_2}$  – энергия молекулы водорода,  $n_I$  – количество атомов азота в структуре,  $m$  – количество атомов водорода,  $k$  – количество избыточных атомов углерода.

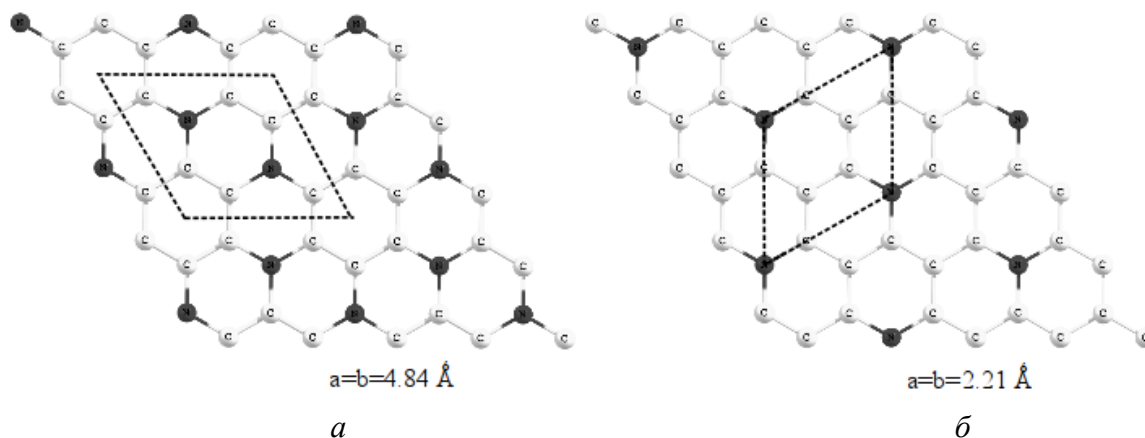
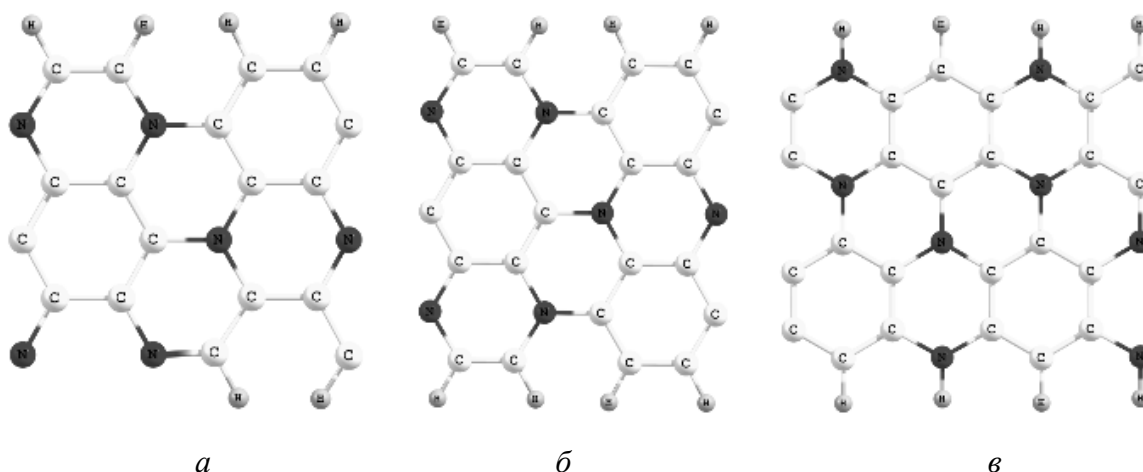


Рис. 1. Элементарные гексагональные ячейки:  
*a* –  $C_3N$ , *b* –  $C_5N$   $a = b = 2.21 \text{ \AA}$



а

б

в

Рис. 2. Наноленты  $C_3N$ : а – нанолента типа *armchair* 3-C-C с типом пассивации  $H_C$ , б – нанолента типа *armchair* 3-C-CN с типом пассивации  $H_C$ , в – нанолента типа *zigzag* 3-CN-CN с типом пассивации  $H_{CN}$

Согласно полученным результатам (табл. 1, 2) все ленты  $C_5N$  являются стабильными в отличие от  $C_3N$ . Среди нанолент типа *zigzag* наиболее выгодными являются 3-CN-CN  $C_3N$  и 5-C-CN  $C_5N$ . При этом стоит отметить, что пассивация типа  $H_{CN}$  стабилизирует структуру. Что касается нанолент типа *armchair*, как для  $C_3N$ , так и для  $C_5N$  самой стабильной является краевая конфигурация C-C. В отличие от нанолент  $C_5N$  типа *zigzag*, пассивация  $H_{CN}$ , наоборот, дестабилизирует структуру. В связи с этим можно предположить, что на стабильность структур влияют не только типы наноленты, пассивации и краевой конфигурации, но и соотношение C:N.

Далее в работе были изучены электронные свойства нанолент. С этой целью был проведен расчет зонной структуры. Число промежуточных точек вдоль исследуемого направления G–X в первой зоне Бриллюэна равнялось 20. Согласно полученным результатам все наноленты  $C_5N$  являются проводниками. В случае  $C_3N$  наноленты типа *zigzag* также обладают проводниковыми свойствами, за исключением структуры с краевой конфигурацией CN-CN и пассивацией типа  $H_{CN}$ . В свою очередь большинство нанолент типа *armchair* являются полупроводниками (табл. 2).

**Таблица 1.** Величины энергии образования и ширины запрещенной зоны в зависимости от типа нанолент  $C_3N$

Тип наноленты	Тип пассивации	Толщина и тип краевой конфигурации	Соотношение C:N	Энергия образования наноленты, эВ	Ширина щели, эВ
<i>zigzag</i>	$H_C$	2-C-CN	3:1	0,124	0,00
		3-C-C	3:1	0,602	0,00
		3-CN-CN	3:1	–0,382	0,00
		4-C-CN	3:1	0,230	0,00
	$H_{CN}$	2-C-CN	3:1	–0,400	0,00
		3-CN-CN	3:1	–1,478	1,04
		4-C-CN	3:1	–0,459	0,04

<i>armchair</i>	$H_C$	2-CN-CN	7:3	-0,462	0,00
		2-C-C	4:1	-3,968	0,98
		2-C-CN	3:1	0,663	0,07
		3-CN-CN	5:2	-0,221	0,00
		3-C-C	11:3	-3,989	0,69
		3-C-CN	3:1	-0,334	0,37
	$H_{CN}$	2-CN-CN	7:3	-0,529	0,09
		2-C-CN	3:1	-0,851	1,20
		3-CN-CN	5:2	-0,744	0,28
		3-C-CN	3:1	-0,765	0,73

**Таблица 2.** Величины энергии образования и ширины запрещенной зоны в зависимости от типа нанолент  $C_5N$

Тип наноленты	Тип пассивации	Толщина и тип краевой конфигурации	Соотношение C:N	Энергия образования наноленты, эВ
<i>zigzag</i>	$H_C$	4-C-CN	5:1	-0,794
		5-C-CN	5:1	-0,813
	$H_{CN}$	4-C-CN	5:1	-0,869
		5-C-CN	5:1	-0,920
<i>armchair</i>	$H_C$	3-CN-CN	11:3	-1,087
		3-C-CN	13:3	-0,533
		4-C-CN	5:1	-0,466
		4-CN-CN	4:1	-1,064
		3-C-C	6:1	-1,299
		4-C-C	5:1	0,006
		5-C-C	19:3	-2,370
	$H_{CN}$	3-CN-CN	11:3	-0,641
		3-C-CN	13:3	-0,346
		4-C-CN	5:1	-0,274
		4-CN-CN	4:1	-0,697

В заключение из проделанной работы можно сделать вывод о зависимости ширины запрещенной зоны от типа нанолент, пассивации, краевой конфигурации и соотношения C:N. Следовательно, наноленты на основе  $C_3N$  и  $C_5N$  могут быть использованы для управления электронными свойствами материала.

# БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 575.224.22; 616.151.5

## **ОДНОВРЕМЕННОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ЧЕТЫРЁХ КЛИНИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ПОЛИМОРФИЗМОВ ПЛАЗМЕННОГО ГЕМОСТАЗА БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ ТВЕРДОФАЗНЫМ МИКРОАНАЛИЗОМ**

**Е.Е. Башмакова**

**Научный руководитель д-р. биол. наук Л.А. Франк**

*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук*

Определение генетических полиморфизмов плазменного гемостаза имеет важное диагностическое и прогностическое значение. Для исследования нами были выбраны четыре полиморфизма плазменного гемостаза. Три из них: мутация Лейден (FV, 1691 G→A; rs6025), полиморфизм гена метилентетрагидрофолатредуктазы (МТГФР, 677 C→T; rs1801133) и мутация гена протромбина (F2, 20210 G→A; rs1799963) повышают риск развития тромботических явлений и развития тромбофилии. Четвертый полиморфизм – полиморфизм гена фактора свертываемости VII (F7, 10976 G→A; rs 6046) – имеет протективный эффект относительно риска развития тромбозов, снижает вероятность инфаркта миокарда и летального исхода при инфаркте миокарда.

Определение данных полиморфизмов важно в комплексе, поскольку тромбофилия – многофакторное заболевание, являющееся результатом совместного воздействия внешних факторов и генетических вариантов нескольких генов. Аналитические системы, позволяющие выявлять сразу несколько мишеней в одном анализе, являются современным направлением молекулярной диагностики и позволяют сократить временные затраты при проведении анализа.

В качестве альтернативы существующим вариантам определения SNP предложена аналитическая технология, основанная на ферментативном удлинении аллель-специфичного праймера (primer extension reaction, PEXT-реакция) с последующей детекцией продуктов реакции с помощью биолоуминесцентных меток на основе кальций-зависимых фотопротеинов (PED-Биолум).

Целью настоящей работы является апробация разработанного метода PED-Биолум для выявления мутаций в гене пятого фактора свертывания (мутация Лейден) и в генах MTHFR, F2 и F7 и создание на его основе мультиплексного анализа для данных полиморфизмов плазменного гемостаза.

Образцы ДНК для исследований были любезно предоставлены *Красноярским филиалом гематологического научного центра*: по 10 образцов для выявления мутации гена F2 и мутации Лейден, 12 образцов для полиморфизма гена F7 и 9 образцов для работы с полиморфизмом гена МТГФР.

Выявление мутаций проводили одновременным биолуминесцентным методом PED-Биолум. В качестве теста сравнения был применен метод полимеразной цепной

реакции в режиме реального времени (ПЦР-РВ) с использованием коммерческого набора «SNP-экспресс-РВ» (НПО «Литех») и амплификатора «iCycler iQ5» (BioRad), а также набор реагентов «АмплиСенс® Пироскрин», форма комплектации № 7 «Фолат-скрин» (ФБУН «Центральный НИИ эпидемиологии») и метод пиросеквенирования на приборе «PyroMark Q24» («Qiagen», Германия).

Нами было создано два пробных набора: «Биолум полиморфизм Лейден» и «Болум полиморфизм МТГФР 677»; данные наборы были адаптированы и опробованы на 83 и 110 образцах ДНК соответственно в условиях клинико-диагностической лабораторий. Были получены положительные заключения от Красноярской краевой ассоциации медицинской лабораторной диагностики для набора «Биолум полиморфизм Лейден» и от ООО «Альтермед» для набора «Болум полиморфизм МТГФР 677».

**Таблица 1.** Сравнение результатов методов PED-Биолум и ПЦР-РВ при отдельном определении полиморфизмов

Полиморфизм	Количество образцов	Количество образцов для каждого варианта генотипа			Несовпадения с результатами ПЦР-РВ
		GG	GA	AA	
F2 (20210 G->A)	10	8	2	0	Образцы с генотипом GA в методе PED-Биолум имели генотип GG
F7 (691 G->A)	12	4	4	4	Результаты полностью совпали
F5 (1691 G->A)	10	9	1	0	Результаты полностью совпали
МТГФР (677 C->T)	9		1	4	Результаты полностью совпали

Для разработки мультиплексного анализа мы использовали образцы ДНК, у которых определены генотипы всех четырех полиморфизмов методами ПЦР-РВ и PED-Биолум. При проведении мультиплексного анализа синтез матриц на все четыре полиморфизма осуществляли в одной пробирке. Полученную смесь матриц использовали в четырёх отдельных РЕХТ-реакциях. Последующие этапы анализа были аналогичны анализу одного отдельно взятого полиморфизма.

Сравнение результатов тестирования выбранных образцов на наличие мутации Лейден и мутаций генов F7, MTHFR и F2 представлено в табл. 1.

При работе с мультиплексным анализом мы не меняли условия метода PED-Биолум и протестировали шесть образцов. Генотипы для мутации Лейден и полиморфизмов генов F2 и F7 полностью совпали с результатами ПЦР-РВ.

Для мутации гена MTHFR при мультиплексном анализе наблюдали несовпадения результатов, которые представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Сравнение результатов, полученных при раздельном определении мутации С677Т гена МТГФР методом РЕД-Биолум, с результатами мультиплексного анализа

DF при раздельном определении	Генотип при раздельном определении	DF в мультиплексном анализе	Генотип в мультиплексном анализе
4,32	СС	0,43	СТ
0,03	ТТ	0,27	СТ
0,5	СТ	0,3	СТ
0,03	ТТ	0,24	СТ
2,5	СС	0,47	СТ
0,03	ТТ	0,25	СТ

DF – дискриминационный фактор.

Мы предположили, что данные расхождения по результатам определения полиморфизма гена МТГФР связаны с конкурентной ПЦР на этапе синтеза матрицы. Мы изменили условия эксперимента следующим образом: увеличили количество праймеров для синтеза МТНFR-матрицы в реакционной смеси в 2 и 4 раза по отношению к исходному количеству и уменьшили количество РЕХТ-праймеров, реагирующих с ДНК- матрицей, несущей мутацию, поскольку биолуминесцентный сигнал, указывающий на наличие в образце мутантной ДНК для гомозиготного генотипа (СС), был высок и значения DF соответствовали гетерозиготному генотипу (СТ). Но данные модификации условий реакции не изменили результатов определения мутации гена МТГФР.

Мы осуществили синтез матриц для полиморфизмов МТГФР и F2 и МТГФР и F5 попарно, чтобы оценить влияние синтеза матриц F2 и F5 на определение полиморфизма гена МТГФР. Результаты представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Результаты определения полиморфизма С677Т МТГФР в двух вариантах мультиплексного анализа

DF (генотип) при раздельном определении	DF (генотип) в мультиплексе F2+МТГФР	DF (генотип) в мультиплексе F5+МТГФР
0,5 (СТ)	0,5 (СТ)	0,61 (СТ)
2,5 (СС)	1,07 (СС)	0,89 (?)
0,03 (ТТ)	0,31 (СТ)	0,26 (СТ)

Как видно из табл. 3, присутствие в реакционной смеси праймеров как для синтеза матрицы для определения мутации Лейден, так и для синтеза матрицы для определения полиморфизма гена F2 влияет на результат определения.

В обоих случаях наблюдалось несовпадение для образцов, имеющих генотип гомозиготный по аллелю Т. Для генотипа гомозиготного по аллелю С, соответствующего нормальному варианту, наблюдалось совпадение результата мультиплекса для полиморфизмов генов МТГФР и F2 с результатом отдельного определения. А при совместном определении полиморфизмов генов МТГФР и F5 результат было трудно интерпретировать, поскольку дискриминационный фактор (DF) имел пограничное значение 0,89: высокое для гетерозиготного генотипа (DF генотипа СТ = 0,2–0,6) и низкое для нормального генотипа (СС) (DF = 1–5).



Таким образом, результаты отдельного определения методом PED-Биолюм полностью совпали с коммерческими наборами при выявлении полиморфизмов генов МТГФР, фактора свертываемости VII и мутации Лейден и выявлено два случая расхождения для полиморфизма гена протромбина.

Метод PED-Биолюм опробован для мультиплексного анализа, и показана возможность одновременной детекции мутации Лейден, полиморфизма фактора свертываемости VII и гена протромбина.

УДК 577.112

## ПОЛУЧЕНИЕ ЛЮЦИФЕРАЗЫ ИЗ METRIDIA LONGA ПРИ ЭКСПРЕССИИ В SF9- КЛЕТКАХ

**М.Д. Ларионова**

**Научный руководитель канд. биол. наук, с.н.с. С.В. Маркова**

*Институт фундаментальной биологии и биотехнологии*

*Сибирский федеральный университет*

*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук*

В качестве репортерных молекул для визуализации внутриклеточных процессов в технологиях биоимиджинга часто используются биолюминесцентные белки благодаря их высокой чувствительности, нетоксичности для клеток, широкому линейному диапазону и простоте запускаемых реакций. Многие клонированные люциферазы и фотопротеины уже были успешно апробированы в качестве репортеров на уровне клеточных культур и лабораторных животных.

Объектом исследования является целентеразин-зависимая люцифераза из морской холодноводной копеподы *Metridia longa*. Этот фермент, осуществляющий окисление субстрата (целентеразина) с испусканием голубого света ( $\lambda_{\max} = 480$  нм), в живой природе является секретлируемым и выделяется из специальных желез рачка при нападении на него хищника. Ранее в лаборатории фотобиологии ИБФ СО РАН были идентифицированы гены некоторых изоформ данной секретлируемой люциферазы. В представленной работе описано получение изоформы люциферазы MLuc7, имеющей большую биолюминесцентную активность по сравнению с другими изоформами. Люцифераза MLuc7 является самой малой по размеру из всех известных на сегодняшний день люцифераз (16,5 кДа), что позволяет считать ее более перспективным биолюминесцентным репортером.

Предположительно, нативная люцифераза MLuc7 имеет до 5 дисульфидных связей, поскольку в аминокислотной последовательности белка содержится 10 цистеиновых остатков. Ранее, при экспрессии в *E.coli* люцифераза была выделена из телец включения. В результате анализа полученного белкового образца было установлено, что препарат являлся гетерогенным и склонным к полимеризации, что свидетельствовало о неправильном сворачивании белковой молекулы при

экспрессии в прокариотической системе. Это обусловлено тем, что окислительно-восстановительный потенциал бактериальной цитоплазмы и отсутствие соответствующих ферментов не позволяет сформировать дисульфидные связи. Поэтому подбор оптимальных условий экспрессии целевого белка, обеспечивающих правильное формирование третичной структуры люциферазы, являлся ключевой задачей исследования.

При использовании бакуловирусной экспрессионной системы и клеток из насекомого *Spodoptera frugiperda* (Sf9) в качестве продуцентов удалось осуществить высокоэффективную экспрессию и секрецию целевого белка в культуральную среду. Для этого была создана рекомбинантная бакмида на основе плазмиды *pFastBac* со вставкой в виде гена люциферазы, кодирующего белок со своим собственным сигнальным пептидом из 17 аминокислот (рис. 1). После отбора клонов методом ПЦР из клеток *E. coli* была изолирована бакмидная ДНК. Далее проводили трансфекцию клеток Sf9 выделенной бакмидой с помощью специального реагента *Cellfectin*, обеспечивающего эффективное проникновение ДНК в клетки. Вирусным стоком инфицировали культуру клеток насекомых и инкубировали в течение четырех суток при 28 °С и постоянном перемешивании.

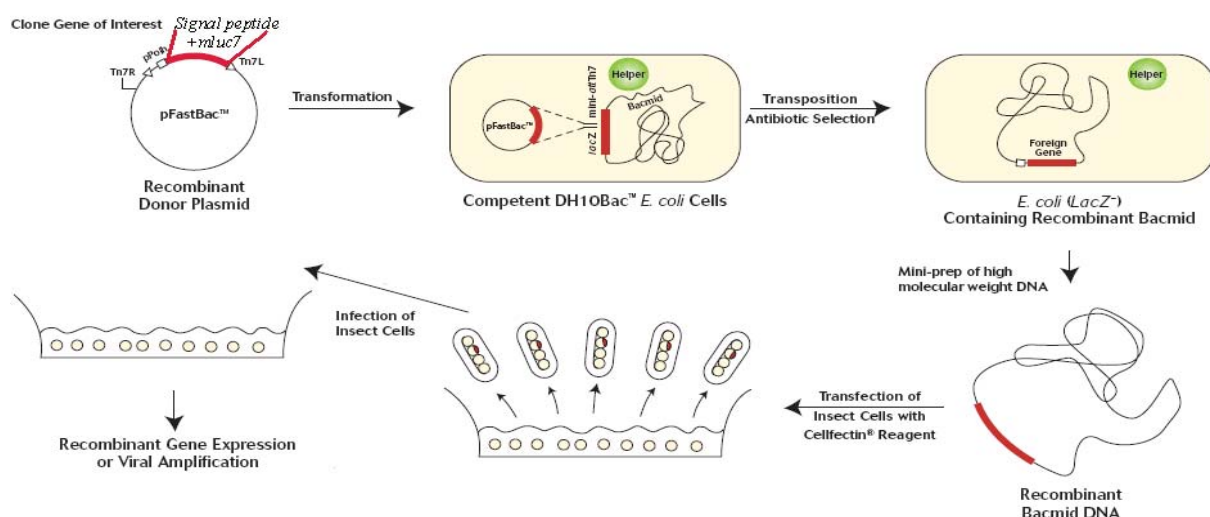


Рис. 1. Схематическое изображение этапов конструирования рекомбинантной бакмиды и инфицирования клеток Sf9

Была разработана и оптимизирована процедура очистки целевого белка из культуральной жидкости, включающая осаждение белков сульфатом аммония, хроматографическую очистку, отщепление гистидинового фрагмента с помощью TEV-протеазы и гель-фильтрацию. В результате проведенных процедур был получен гомогенный белковый препарат высокой степени очистки с высокой люциферазной активностью (рис. 2). Продукция целевого белка составляла 3 мг/л культуральной жидкости.

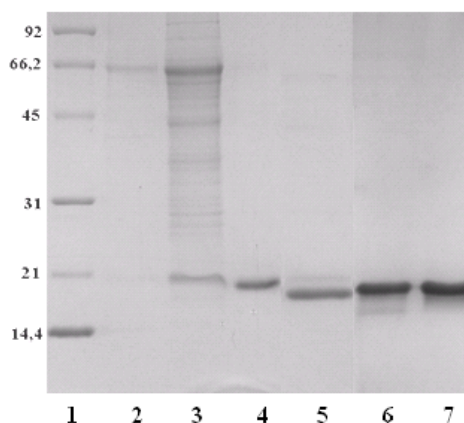


Рис. 2. SDS-ПААГ-электрофореграмма белковых образцов: 1 – маркеры молекулярного веса, 2 – культуральная жидкость, 3 – растворенный осадок, 4 – препарат после металл-аффинной хроматографии на колонке Ni-trap HP, 5 – расщепление образца TEV-протеазой, 6 – очищенный белковый препарат после расщепления, 7 – образец после проведения гель-фильтрации на колонке Superdex-75

Описаны некоторые физико-химические и биохимические свойства люциферазы MLuc7. Была исследована зависимость уровня сигнала биолюминесценции от различных параметров, таких как pH, температура и концентрация NaCl. Для оценки степени сродства фермента с субстратом было определено значение константы Михаэлиса.

В результате данного исследования впервые было осуществлено получение люциферазы MLuc7 в нативной форме, разработана методика очистки белка из культуральной жидкости, а также исследованы физико-химические и биохимические свойства люциферазы.

УДК 579,61:616-078

## **ГИБРИДНЫЙ БЕЛОК МИНИАНТИТЕЛО-ЛЮЦИФЕРАЗА *Renilla*: ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ РЕПОРТЁРА ДЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ИММУНОАНАЛИЗА**

**М.А. Шендрик**

**Научный руководитель д-р биол. наук, проф. Л.А. Франк**

*Сибирский федеральный университет*

Одной из главных задач современной биотехнологии является конструирование диагностических систем для медицинских нужд. Современные методы молекулярной диагностики должны обладать высокой специфичностью и чувстви-

тельностью и при этом быть достаточно недорогими и безопасными для рутинного применения.

В лаборатории фотобиологии Института биофизики СОРАН разрабатываются методы иммунодиагностики, в которых в качестве репортёрных молекул используются светоизлучающие белки – люциферазы или фотопротеины. Это ферменты, одним из продуктов реакций которых является квант света в видимой области спектра. Получение биолуминесцентных меток осуществляют двумя способами: 1) химическое конъюгирование биоспецифической молекулы (например, антитела) с молекулой-репортером (например, люциферазой); 2) с помощью генетического фьюзинга.

Цель настоящей работы – получение гибридного белка, пригодного для использования в качестве высокочувствительного и специфичного репортера в биолуминесцентном иммуноанализе вируса клещевого энцефалита.

На рис. 1 схематически представлены элементы, входящие в состав целевого гибридного белка: домен миниантитела 14D5ab (mAb), специфичного к белку Е (капсидный белок вируса клещевого энцефалита), и домен репортерного белка люциферазы мягкого коралла *Renilla muelleri* Rm7 (RmLuc), между которыми находится гибкий линкер (GGG)<sub>4</sub>. Для аффинного выделения на конце конструкции находится гексагистидиновый фрагмент His-tag. В одном случае гибридный белок содержит лидерный пептид ompA, обеспечивающий транспорт целевого белка в периплазматическое пространство бактериальной клетки, в процессе которого происходит фолдинг домена миниантитела (рис. 1, б).



Рис. 1. Структура целевых гибридных белков

Для получения гибридных белков нами с помощью методов генетической инженерии были получены соответствующие генетические конструкции (А) pFLAG-14D5ab-(GGG)<sub>4</sub>-Rm7-His6 и (Б) pFLAG-OmpA-14D5ab-Rm7-His6, правильность которых подтверждена секвенированием.

Целевой белок А получали синтезом в цитоплазме клетки *E.coli* штамма *Rosetta Gami2* (Novagen), трансформированной плазмидой А. Клетки данного штамма содержат мутированные гены тиоредоксинредуктазы и глутатионредуктазы, в результате чего существенно активируются реакции образования дисульфидных связей в цитоплазматических белках. В нашем случае это свойство обеспечивает правильный фолдинг домена миниантитела.

При получении того же гибридного белка переносом в периплазматическое пространство использовали клетки *E.coli* штамма BL21 Codon Plus (DE3) RIPL, трансформированные плазмидой Б.

Белки выделяли и очищали металл-аффинной хроматографией на сорбенте  $\text{Co}^{2+}$ -Агароза (*Talon, Clontech*). За ходом выделения следили гель-электрофорезом и по биолюминесценции соответствующих фракций.

По данным ДСН – ПААГ электрофореза в обоих типах клеток после ИПТГ-индукции появляется полоса целевого белка с молекулярной массой 63,9 кДа (Рисунок 2), который в случае конструкции А находится в цитоплазме и составляет 1,7 % от общего количества белков. После очистки был получен препарат, в котором целевой белок является основным и составляет 45 % от суммарного белка. В случае конструкции Б гибридный белок находится в цитоплазме, периплазматическом пространстве и в тельцах включения (основное количество). После очистки белка его количество настолько мало, что целевой полосы на геле не обнаруживается.

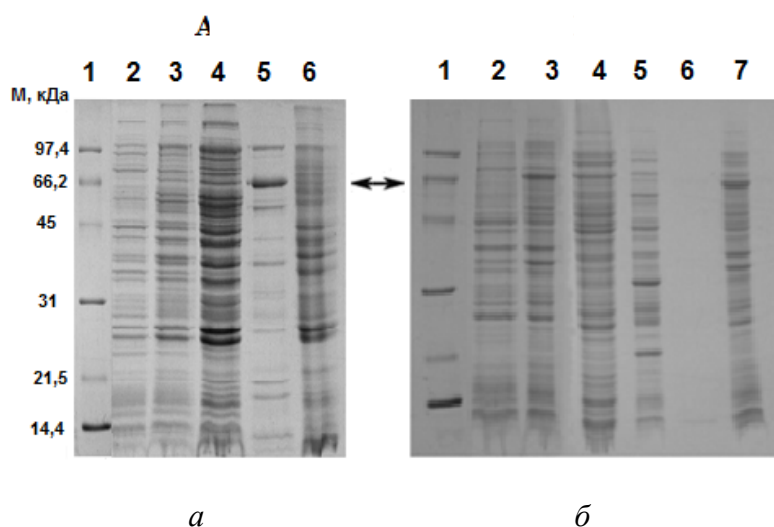


Рис. 2. 12,5 % ДСН – ПААГ электрофорез образцов, полученных при выделении гибридного белка 14D5ab-Rm7-His6: а – экспрессия в клетках *E.coli* штамм *Rosetta Gami2*: 1 – стандартные белки; 2, 3 – клетки до и после индукции; 4 – цитоплазматическая фракция; 5 – препарат целевого белка после очистки из цитоплазмы; 6 – тельца включения (раствор в 6М мочеvine); б – экспрессия в клетках *E.coli* штамм *BL21 Codon Plus (DE3) RIPL*: 1, 2, 3, 4 – то же, что и на рисунке а; 5 – периплазматическая фракция; 6 – препарат целевого белка после очистки из периплазмы; 7 – тельца включения (раствор в 6М мочеvine). Стрелкой показана полоса целевого белка

Распределение целевого белка в полученных фракциях изучали и по биолюминесцентной активности (рис. 3). Приведенные значения представляют собой среднее от трех измерений.

В случае конструкции с лидерным пептидом транспорт целевого белка в периплазматическое пространство составил 25 %, однако биолюминесцентная активность периплазматической фракции значительно меньше, чем у цитоплазматических фракций конструкции без лидерного пептида. Количество белка, выделенного с 2,5 грамм биомассы, в целевой фракции после очистки составило 0,013 мг, что также значительно меньше, чем у конструкции без лидерного пептида – 1,2 мг.

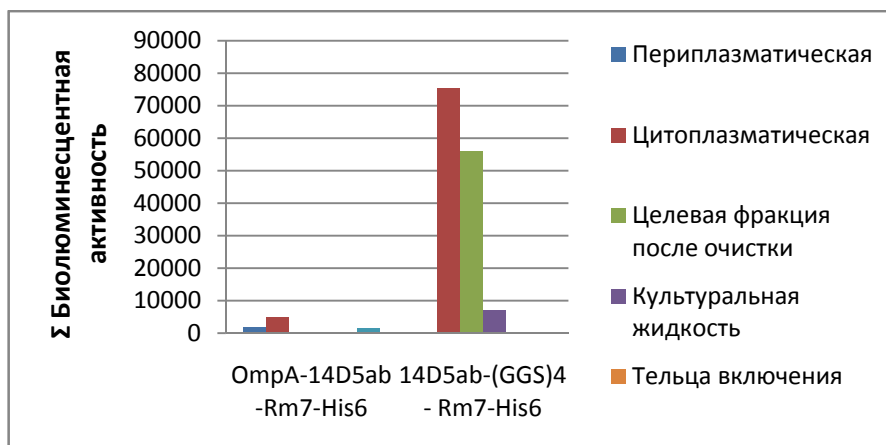


Рис. 3. Суммарная биолуминесцентная активность в фракциях после выделения целевого белка, отн. ед.

Таким образом, при экспрессии в цитоплазме клеток *E.coli* Rosetta Gami2 по сравнению с получением гибридного белка переносом в периплазматическое пространство существенно повышается выход целевого белка (биолуминесцентную активность нормировали по биомассе клеток).

Ключевым свойством полученного гибрида помимо биолуминесценции является аффинность домена антитела к мишени. Взаимодействие полученного гибрида с мишенью исследовали твердофазным биолуминесцентным анализом. В лунки, активированные рекомбинантным белком Е (вирусоспецифичный белок, входит в состав капсидной оболочки вируса клещевого энцефалита), вносили аликваты гибридного белка, инкубировали, промывали и измеряли биолуминесцентную активность образованного на поверхности комплекса. В качестве контроля параллельно исследовали сорбцию на лунки, не активированные белком Е. На рис. 4 показана полученная зависимость биолуминесцентного сигнала от концентрации химерного белка.

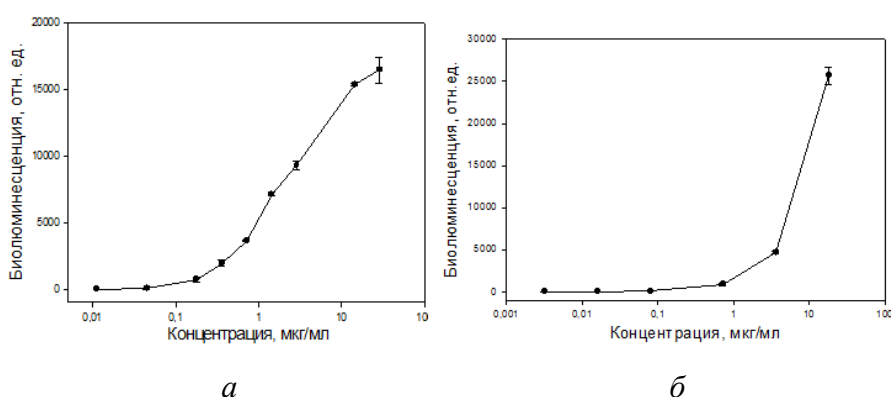


Рис. 4. Твердофазный иммуферментный анализ. Взаимодействия гибридного белка полученного: а – из цитоплазмы *E.coli* Rosetta Gami2; б – из периплазматического пространства *E.coli* BL21 Codon Plus (DE3) RIPL; с рекомбинантным белком Е вируса клещевого энцефалита. Каждая точка представляет среднее от трёх независимых определений

Величина константы диссоциации  $K_d$  гибридного белка составила  $(4,15 \pm 0,35) \times 10^{-8}$ , что близко к значению  $K_d$  исходного антитела 14D5ab –  $6 \times 10^{-8}$  М (И.К. Байков, ИХБиФМ СО РАН).

Количества целевого белка, полученного переносом в периплазматическое пространство клетки, чрезвычайно мало, что не позволило подсчитать его  $K_d$ .

Пригодность полученной метки для выявления вируса клещевого энцефалита проверяли с использованием коммерческого набора «ВектоВКЭ – антиген» предназначенного для диагностики вируса клещевого энцефалита фирмы «Вектор БЕСТ» (Новосибирск). Анализ проводили по протоколу производителя с использованием образцов положительного и отрицательного контроля. Для выявления антигена в лунки вносили растворы нашей метки в двух разных концентрациях с биолуминесцентной активностью 22 и 44 относительные световые единицы. В таблице представлены результаты измерений биолуминесцентного сигнала при взаимодействии метки с положительным и отрицательным контролем. Приведенные значения представляют собой среднее от трех измерений.

**Таблица.** Выявление антигена в коммерческом наборе «Вектор-Бест» полученной биолуминесцентной меткой

Активность метки, отн. Ед.	Биолуминесцентный сигнал, отн. ед.	
	22	44
Контроль –	$41,24 \pm 13,05$	$17,78 \pm 2,37$
Контроль +	$1939,13 \pm 114,41$	$1222,525 \pm 240,17$

Из таблицы видно, что независимо от количества используемой метки значения биолуминесценции в образцах с положительным контролем на порядок и более выше, чем в образцах с отрицательным контролем.

Таким образом, созданный нами штамм-продуцент рекомбинантных клеток *E.coli* Rosetta Gami2/pFLAG-14D5ab-(GGS)<sub>4</sub>-Rm7-His6 экспрессирует в цитоплазму целевой гибридный белок, обладающий биолуминесцентной активностью люциферазного домена и аффинностью к вирусу клещевого энцефалита домена антитела. Показана пригодность полученного белка как репортёра в иммуноанализе для выявления вируса клещевого энцефалита.

# БИОФИЗИКА

УДК 543.94, 577.151.03

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО БИФЕРМЕНТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТОКСИЧНОСТИ ПОЧВ

**Е.М. Байгина**

**Научный руководитель Н.В. Римацкая**

*Сибирский федеральный университет*

### **Введение**

Почва является жизненно важным природным ресурсом для всех организмов и для человека в том числе. Необходимо контролировать качество почвы и отслеживать негативные изменения. Для выявления антропогенного загрязнения долгое время использовались химико-аналитические методы. С их помощью можно выявить потенциальную угрозу. В последние десятилетия стали развиваться принципиально новые методы оценки состояния окружающей среды – биологические. Только биотестирование отражает степень воздействия потенциальной угрозы на живой организм и возможные последствия.

Существующие методы биотестирования, использующие для комплексного анализа почв высшие растения, водоросли, дафнии и бактерии, являются трудоемкими и длительными. В сравнении с ними анализ с помощью биолюминесцентной реакции бактериальных ферментов является перспективным методом биотестирования.

Он обладает стабильностью, высокой чувствительностью, специфичностью, что позволяет получить быстрые и надежные результаты. Существует методика оценки токсичности водных сред на основе ферментативной системы НАДН:ФМН-оксидоредуктаза-люцифераза. Токсичность образцов оценивается по влиянию загрязнителей на параметры биолюминесценции биферментной системы. Биолюминесцентный метод не отменяет методы аналитической химии, но с помощью него возможно дать быструю и недорогую интегральную оценку токсичности образцов как в лаборатории, так и в полевых условиях.

На основе имеющейся методики для анализа водных сред биолюминесцентным методом можно разработать метод для оценки токсичности почвы. При этом необходимо использовать водный экстракт, а также выявить чувствительность биферментной системы к данному образцу и подобрать условия для тестирования.



Поэтому целью настоящей работы является оценка возможности проведения анализа токсичности почв билюминесцентным методом. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) подобрать условия пробоподготовки почвы для проведения анализа с помощью билюминесцентного метода;
- 2) изучить влияние индивидуальных характеристик проб почв (рН, абсорбционные свойства) на ферментативную систему НАДН:ФМН-оксидоредуктаза-люцифераза;
- 3) исследовать действие проб почв разных районов г. Красноярска на биферментную билюминесцентную систему с учетом индивидуальных характеристик;
- 4) предложить подходы для разработки метода тестирования почв с помощью биферментной билюминесцентной системы.

### **Материалы и методы**

Было отобрано 15 образцов почвы разных районов города Красноярска. Пробоподготовка проводилась в соответствии с ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.11-04 16.1:2.3:3.8-04. Почвы, отобранные с территорий, которые необходимо проконтролировать

на токсичность (загрязнение), освобождают от корней, крупных посторонних частиц и высушивают при 105 °С в течение 1 часа. После охлаждения воздушно-сухую пробу почвы растирают в ступке, просеивают через сито с отверстиями в 3 мм и тщательно перемешивают. Навеску почвы (массой не менее 5,0 г) помещают в коническую колбу, мерным цилиндром приливают пятикратный объем дистиллированной воды (рН 6,8–7,4) (5 см<sup>3</sup> на 1 г образца), взбалтывают в течение 5 минут и оставляют для экстракции на 24 часа. Через 24 часа экстракт фильтруется через бумажный фильтр – белая, красная ленты (только в случае мутной надосадочной жидкости). После фильтрации пробу центрифугируют, чтобы осадить нерастворимые в воде гуминовые вещества («Eppendorf» centrifuge 5810 R, 20 мин., 1400 об./с). Кислотно-основные свойства почвы определяются согласно стандартной методике определения рН растворов, с использованием рН-метра («HANNA Instruments», HI 2211 рН/ORP Meter).

В биотесте использовалась бактериальная биферментная система НАДН:ФМН-оксидоредуктаза-люцифераза. Реакционная смесь включает в себя:

- 300 мкл Na-K-фосфатного буфера 0,05М, рН 6,8;
- 10 мкл КРАБа – комплект реактивов аналитической билюминесценции (Институт биофизики СО РАН, Красноярск);
- 50 мкл C<sub>14</sub> (тетрадеканаль, 0,0025 %), («Merck», Германия);
- 100 мкл NADH 4x10<sup>-4</sup> моль/литр (никотинамидадениндинуклеотид), (производство «Sigma», США);
- 50 мкл исследуемого вещества;
- 10 мкл ФМН 5x10<sup>-4</sup> моль/литр (фламинмононуклеотид), (производство «Serva», Германия).

Реакционная смесь помещается в измерительную кювету люминометра («Promega GloMax» 20/20 Luminometer, USA). В качестве анализируемого параметра выступает величина остаточного свечения  $T$ , которая находится по формуле  $T = I/I_0 \times 100 \%$ , где  $I$  – интенсивность свечения образца и  $I_0$  – интенсивность свечения контроля (дистиллированная вода).

Водные вытяжки почв имеют разную окраску и степень мутности, следовательно, обладают различными абсорбционными свойствами. Этот факт необходимо учитывать при работе с оптическими системами. Поэтому для корректировки биolumинесцентного анализа используются данные спектрофотометрического измерения вытяжек почв («Shimadzu» UV Spectrophotometer UV-1800, USA). Спектр поглощения сравнивается со спектром биolumинесценции биферментной системы, диапазон измерения 420–630 нм. При этом, если значение абсорбции на длине волны 420 нм ( $A_{420}$ ) превышает 0,100, то эффект светорассеяния необходимо учитывать. Корректировка результата величины свечения образца в люминометре проводилась по формуле (1):

$$I_0 = \frac{I(L)}{\sum_{i=1}^n \frac{g(\lambda_i)}{D_i(\lambda_i)(L/l)} [1 - \exp(-D_i(\lambda_i)(L/l))]} \quad (1)$$

где  $I(L)$  – экспериментально определенная интенсивность биolumинесценции в исследуемом образце толщиной  $L$ ;  $g(\lambda_i)$  – доля интенсивности биolumинесценции на длине волны  $\lambda_i$  от суммарной интенсивности биolumинесценции;  $D_i(\lambda_i)$  – значение поглощения исследуемого экстракта почвы на длине волны  $\lambda_i$  в кювете шириной  $l$ .

Вывод о токсичности образца делается на основе значения величины остаточного свечения  $T \%$  (согласно ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04 16.1:2.3:3.8-04):

- 1-я группа –  $T > 80 \%$  – образец не токсичен (допустимая степень токсичности);
- 2-я группа –  $50 \% < T < 80 \%$  – образец токсичен;
- 3-я группа –  $T < 50 \%$  – образец сильно токсичен.

## Результаты и обсуждение

Почвы представляют собой сложные многокомпонентные системы. Они различаются между собой по разным параметрам, таким как образующая порода, кислотно-основные свойства, органический и минеральный состав и др. Важно сделать метод анализа универсальным. Для этого необходимо выделить определенные, главные для данного метода свойства и учитывать их.

Одним из важных параметров, влияющих на биферментную биolumинесцентную систему, являются кислотно-основные свойства образца. Как известно, работа фермента сильно зависит от pH. Оптимум pH для системы НАДН:ФМН-оксидоредуктаза-люцифераза находится в области 6,8–7,1.

Вторым важным параметром являются абсорбционные свойства водной вытяжки почвы. Экстракты различаются по цвету и мутности. Эти факторы необходимо исключить, чтобы не допускать искажения результатов. При этом сравнивается спектр абсорбции и биolumинесценции на одном диапазоне 420–630 нм. Абсорбционная кривая имеет ниспадающий характер, с наибольшим значением

при длине волны 420 нм. Если в данной области значение абсорбции превышает 0,100, то необходимо рассчитывать коэффициент коррекции по формуле (1).

Все измеренные параметры и результаты анализа почв на токсичность биоллюминесцентным методом до и после коррекции представлены в таблице.

**Таблица.** Сравнительный анализ индивидуальных характеристик и результатов биоллюминесцентного анализа почв

Место забора пробы	pH	A <sub>420</sub>	T%	Коэф. корр.	T% коррект.	Токсичность
Ветлужанка (озеро)	7,50	0,017	91,90	1	91,90	Не токсичен
Академгородок (Институт леса)	8,04	0,129	65,84	1,026276	70,65	токсичен
О. Татышев	7,77	0,077	86,23	1	86,23	Не токсичен
КРАЗ-1	8,05	0,074	65,12	1	65,12	токсичен
Железнодорожный район (возле вокзала)	8,03	0,188	68,31	1,058997	72,34	токсичен
Коммунальный мост (под мостом)	<b>7,89</b>	<b>0,441</b>	<b>38,43</b>	<b>1,064831</b>	<b>40,92</b>	<b>Сильно токсичен</b>
Кировский район (под стелой)	<b>8,27</b>	<b>0,292</b>	<b>38,26</b>	<b>1,049399</b>	<b>40,15</b>	<b>Сильно токсичен</b>
Ленинский район (под стелой)	8,04	0,092	55,42	1	55,42	токсичен
Николаевка	7,93	0,088	55,91	1	55,91	токсичен
КрасТЭЦ	<b>7,88</b>	<b>0,247</b>	<b>6,62</b>	<b>1,056719</b>	<b>7,00</b>	<b>Сильно токсичен</b>
Солонцы	8,12	0,153	87,17	1,02503	89,35	Не токсичен
О. Отдыха (стадион Ярыгина)	8,00	0,106	59,07	1,018657	60,17	токсичен
Шинный завод	7,95	0,245	63,34	1,045111	66,20	токсичен
Центральный район (Святопокровский храм)	7,98	0,085	93,31	1	93,31	Не токсичен
Сопка (биатлон)	7,23	0,072	68,51	1	68,51	токсичен

Из таблицы можно заметить, что все значения pH вытяжек почв не входят в pH-оптимум биферментной системы. На данном этапе исследования невозможно сделать вывод о влиянии pH на оценку токсичности, так как щелочные свойства экстракта почвы могут быть обусловлены собственными характеристиками или влиянием внешнего загрязнителя.

Некоторые водные вытяжки почв оставались сильно окрашенными и мутными даже после фильтрации и центрифугирования. Этот факт отражают значения абсорбционных свойств почв (A<sub>420</sub>), которые не должны превышать 0,100 для достоверной оценки интенсивности свечения без учета светорассеяния. Для более чем 50 % образцов необходим расчет коэффициента коррекции (коэф. корр.).

Анализируя результаты величины остаточного свечения после корректировки (Т % коррект.), можно заметить, что одна пятая образцов являются сильно токсичными. Примерно столько же проб почв не токсичны вовсе или имеют допустимую степень токсичности. Самым токсичным образцом является проба 10 (район КрасТЭЦ), самыми «чистыми» образцами оказались пробы 1 (район Ветлужанка) и 14 (Центральный район, Святопокровский храм).

### **Выводы**

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) для проведения биотестирования на основе биферментной системы НАДН:ФМН-оксидоредуктаза-люцифераза необходимо осуществлять пробоподготовку почвы в соответствии с ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.11-04 16.1:2.3:3.8-04, с добавлением процедуры центрифугирования;

2) для исключения влияния индивидуальных характеристик проб почв необходимо измерять абсорбционные свойства образцов, для проб со значением  $A_{420}$ , превышающим 0,1, рассчитывать коэффициент корректировки;

3) результаты анализа токсичности почв Красноярска показали, что большинство почв являются токсичными, в районе КрасТЭЦ остаточное свечение проб почв составляет 7 % – самый токсичный образец, тогда как в Центральном районе (Святопокровский храм) и в Ветлужанке (озеро) остаточное свечение – 93 % и 92 % соответственно – нетоксичные пробы;

4) для разработки биолюминесцентного тестирования почвы требуется провести ряд исследований по увеличению чувствительности биотеста, сравнительный анализ полученных результатов биотестирования с химическим анализом и другими биотестами. Это позволит разработать критерии оценки разной степени токсичности почвы.

УДК 543.94

## **БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ФЕРМЕНТАТИВНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА МИКРОБНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

**М.А. Кириллова**

**Научный руководитель канд. биол. наук Е.Н. Есимбекова**

*Сибирский федеральный университет*

Традиционными методами анализа микробного загрязнения в микробиологии являются чашечный метод Коха, методы кратных и предельных разведений. Данные методы достаточно трудоемкие (занимают 24–72 часов), поэтому на их смену пришли более быстрые методы подсчета колонии. Наиболее распространенными являются биолюминесцентные методы анализа микробного загрязнения, использующие, главным образом, биолюминесценцию светляков и позволяющие с

высокой чувствительностью определять степень бактериальной обсемененности пищевых продуктов, а также количество микроорганизмов в воде и воздухе. Принцип методов с использованием люциферазы светляков состоит в определении количества АТФ, пропорционального содержанию микробных клеток. Кроме люциферин-люциферазной системы светляков существует принципиальная возможность использования для анализа микробного загрязнения биолюминесцентной системы фотобактерий.

Цель данной работы – оценить возможность разработки метода анализа бактериального загрязнения на основе биолюминесцентной ферментативной системы светящихся бактерий.

По аналогии с методом анализа микробного загрязнения на основе светляковой люциферазы биолюминесцентный анализ бактериального загрязнения с использованием ферментативной системы светящихся бактерий может быть основан на измерении в анализируемом образце таких важных соединений, как флавинмононуклеотид (FMN) или никотинамиддинуклеотид (NADH). FMN и NADH представляют собой ключевые коферменты многих метаболических цепей в бактериальных клетках и одновременно являются субстратами биферментной системы светящихся бактерий NADH:FMN-оксидоредуктаза-люцифераза. Таким образом, количество FMN или NADH в анализируемом образце, измеренное биолюминесцентным методом, будет пропорционально количеству бактериальных клеток.

Для достижения максимальной чувствительности биферментной системы к FMN и NADH в анализируемых образцах варьировали условия проведения анализа. Были найдены концентрации компонентов реакции (ферментов и субстратов), позволяющие определять минимальное содержание FMN в анализируемом образце. Для этого варьировали содержание NADH и ферментов в реакционной смеси, оставляя неизменным содержание FMN.

Максимальная чувствительность биферментной системы к FMN составила 1,2 нМ. Линейный отклик системы находится в диапазоне от 1,2 нМ до 10 мкМ FMN (рис. 1). Из литературных данных известно, что чувствительность биолюминесцентной системы светляков к АТФ составляет 0,01 пМ, что выше чувствительности биферментной системы светящихся бактерий к FMN на пять порядков.

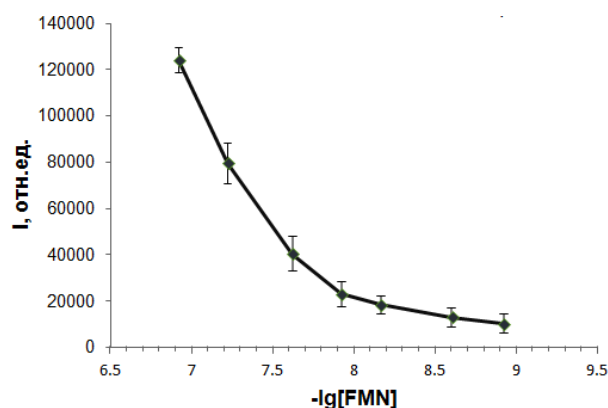


Рис. 1. Зависимость интенсивности свечения биферментной системы NADH:FMN-оксидоредуктаза-люцифераза от концентрации FMN в реакционной смеси

Для обеспечения максимальной чувствительности биферментной системы к NADH были подобраны концентрации ферментов и субстратов, позволяющие определять минимальное содержание NADH в анализируемом образце. Для этого измеряли биолюминесцентный сигнал при добавлении 100 мкл 5 нМ раствора NADH и последовательном варьировании содержания FMN, тетрадеканала или ферментов в реакционной смеси, оставляя неизменным содержание других компонентов.

При проведении данных исследований наблюдалось значительное фоновое свечение, то есть наличие биолюминесцентного сигнала в отсутствие NADH в реакционной смеси. В дальнейшем для уменьшения фонового свечения реакционную смесь предварительно выдерживали в течение 6 минут, после чего запускали реакцию добавлением NADH различных концентраций.

В результате были выбраны оптимальные количества ферментов и субстратов в реакционной смеси, обеспечивающие максимальную чувствительность биферментной системы к NADH, которая составила 0,1 пМ. Линейный отклик системы находится в диапазоне от 0,1 пМ до 1 нМ (рис. 2). Таким образом, чувствительность биферментной системы светящихся бактерий к NADH ниже чувствительности ферментативной системы светляков к АТФ в 10 раз.

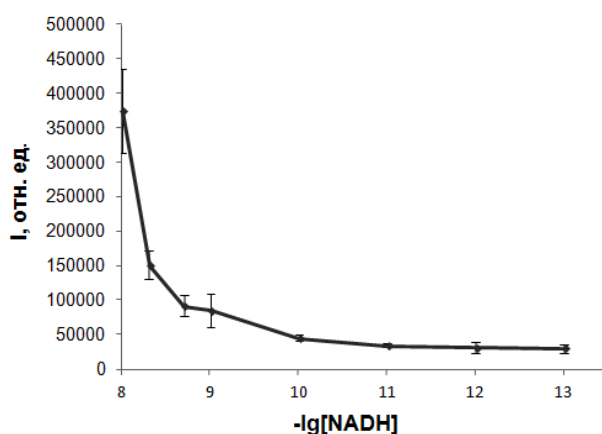


Рис. 2. Зависимость интенсивности свечения биферментной системы NADH:FMN-оксидоредуктаза-люцифераза от концентрации NADH в реакционной смеси

В качестве модельного микробного образца для определения возможности использования биолюминесцентной системы NADH:FMN-оксидоредуктаза-люцифераза в анализе степени биологического загрязнения использовали клетки *Escherichia coli*, разрушенные ультразвуковым дезинтегратором при частоте 44 кГц. Образцы добавляли по 10 мкл в реакционную смесь вместо раствора FMN или NADH. Для построения зависимости интенсивности свечения от количества клеток в образце клеточные суспензии разбавляли в 2, 3, 4, 5, 8, 10, 16 раз. Каждый раз перед добавлением анализируемого образца измерялось фоновое свечение.

При добавлении бактериальных клеток в реакционную смесь интенсивность свечения зависела от их количества как в случае определения FMN, так и NADH. Предел чувствительности определяли как количество клеток, при котором интенсивность свечения биферментной системы в присутствии образца в 3 раза превышала интенсивность фонового свечения.

Максимальная чувствительность биolumинесцентной системы составила 3,9 млн. и 800 тыс. бактериальных клеток при анализах, основанных на определении содержания FMN и NADH соответственно. По сравнению с биolumинесцентной системой светляков, предел обнаружения которой составляет 1000 клеток/мл, система светящихся бактерий слабее по чувствительности на три и два порядка при использовании методик, основанных на количественном анализе содержания FMN и NADH соответственно. Таким образом, в качестве определяемого ключевого метаболита в анализе степени микробного загрязнения следует использовать АТР.

УДК 535.37:577.325.3

## **СЕЛЕКТИВНОЕ ТУШЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЛЮЦИФЕРАЗЫ *PHOTOBACTERIUM LEIOGNATHI***

**О.О. Лашук**

**Научные руководители М.А. Герасимова,  
канд. физ.-мат. наук Е.В. Немцева**

*Сибирский федеральный университет*

Белки в водных растворах обладают собственной люминесценцией в ближней ультрафиолетовой области. Главными люминесцирующими группами в белках являются такие ароматические аминокислотные остатки, как тирозин (Y), фенилаланин (F), триптофан (W). Параметры люминесценции позволяют охарактеризовать свойства окружения ароматических аминокислотных остатков, а также установить их локализацию в белках. Используя высокую чувствительность люминесценции аминокислот к изменениям в их окружении, можно изучать структурные и физико-химические изменения в белковых молекулах, включая функционально значимые изменения. Для правильной интерпретации изменения белковой люминесценции необходимо знать точное расположение флуорофоров внутри белка. Проводить картирование экспонированных и погруженных хромофоров белка становится особенно актуальным в случае отсутствия его кристаллической структуры.

Одним из методов, способствующих определению локализации хромофоров в белке, является метод селективного тушения собственной люминесценции. Метод основан на том факте, что молекулы тушителя, дезактивирующие возбужденные состояния лишь при столкновениях, будут тушить флуоресценцию внешних, доступных растворителю хромофоров более эффективно, чем излучение внутренних хромофоров, менее доступных растворителю. В качестве молекул тушителя используются катионы ( $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Eu}^+$ ), анионы ( $\text{I}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ) и нейтральные молекулы

(O<sub>2</sub>, акриламид). Необходимость выбора тушителей различной полярности и заряда обусловлена тем, что эффективность тушения флуоресценции определяется локальной концентрацией тушителя в окружении хромофора, которая зависит от полярности и заряда хромофора, а также его ближайшего окружения.

Предметом изучения настоящего исследования являлась бактериальная люцифераза *Photobacterium leiognathi*. Она является гетеродимером, α-субъединица которого содержит 354 аминокислотных остатка (из них F – 19, Y – 12, W – 5), а β-субъединица – 325 остатка (из них F – 17, Y – 16, W – 2). Кристаллическая структура данного белка до сих пор не была получена, поэтому нет данных о расположении основных хромофоров в глобуле.

Цель исследования заключалась в сравнительном анализе доступности триптофанов в составе люциферазы бактерий *P. leiognathi* для тушителей с разным зарядом.

### Материалы и методы

Использовали рекомбинантную люциферазу бактерий *P. leiognathi*, растворенную в 0,05 М фосфатном буфере, а также раствор акриламида (10 М) и растворы KI, CsCl, KCl (3 М) в том же буфере.

В кварцевую кювету, содержащую 2 мл раствора люциферазы, последовательно, малыми дозами, добавляли раствор каждого из тушителей, регистрируя спектр флуоресценции после каждого добавления. Общий объем добавленного тушителя не превышал 10 % от изначального объема раствора в кювете.

При титровании фермента растворами CsCl и KI степень тушения флуоресценции определяли с учетом ионной силы, для этого в тех же условиях провели титрование белка раствором KCl. Также при тушении люминесценции йодидом в кювету добавляли сульфит натрия (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) для предотвращения образования ионов I<sup>3-</sup>.

Спектры флуоресценции растворов отдельных соединений и их смесей снимали при длине волны возбуждения 295 нм и спектральных щелях 1,2 нм. Полученные спектры корректировали с учетом спектральной чувствительности прибора, эффекта внутреннего фильтра и объемного разведения, также из спектров был вычтен фон от растворителя.

Анализ тушения флуоресценции проводили по уравнению Штерна – Фольмера:

$$\frac{F_0}{F} = 1 + K_{SV}[Q],$$

где  $F_0$  и  $F$  – интенсивности флуоресценции в отсутствии и в присутствии тушителя, соответственно,  $K_{SV}$  – штерн-фольмерская константа тушения,  $[Q]$  – концентрация тушителя.

Эффективность тушения определяли по формуле:

$$\gamma = \frac{K_p}{K_{AA}}.$$



$K_R$  и  $K_{AA}$  – константы Штерна-Фольмера соответственно для белка и свободной аминокислоты в растворе.

Анализ доступности внешних и внутренних триптофановых остатков тушителям проводили по интенсивности флуоресценции люциферазы при длинах волн 380 и 300 нм соответственно.

### Результаты и обсуждение

Анализ спектров собственной флуоресценции люциферазы при увеличении концентрации тушителя в среде выявил следующие закономерности.

При использовании в качестве тушителя CsCl наблюдается слабое тушение. Контур флуоресценции при этом не изменяется (рис. 1), что может свидетельствовать об одинаковом влиянии ионов цезия на все флуорофоры в белке. Такой результат может свидетельствовать о недоступности экспонированного в среду триптофанового остатка люциферазы положительно заряженному тушителю. То есть в окружении внешнего флуорофора имеются положительно заряженные области.

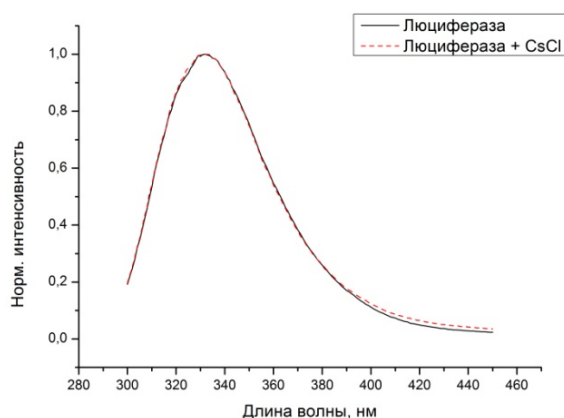


Рис. 1. Нормированный спектр флуоресценции

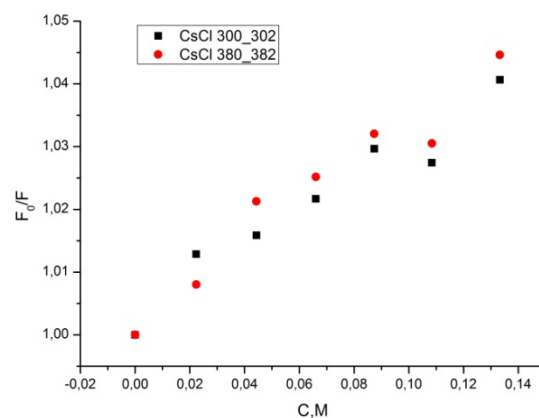


Рис. 2. Тушение флуоресценции люциферазы ионами  $Cs^+$

Из рис. 2 видно, что константы Штерна – Фольмера  $K_{sv}$  для ионов цезия имеют близкие значения для внешних и внутренних триптофанов.

При тушении собственной люминесценции люциферазы с помощью KI падение квантового выхода при последнем добавлении составляет 26 %. При больших концентрациях KI наблюдается смещение контура флуоресценции влево, а также его сужение (от 55 нм до 53 нм) (рис. 3). При этом правый край контура, соответствующий экспонированным триптофанам, смещается на 2 нм, а левый край спектра не изменяет своего положения, что говорит о влиянии KI только на экспонированные триптофаны. Поэтому разница в зависимостях Штерна-Фольмера для длинноволновой и коротковолновой частей спектра для йодид-ионов выражена гораздо ярче, чем для ионов цезия (рис. 4).

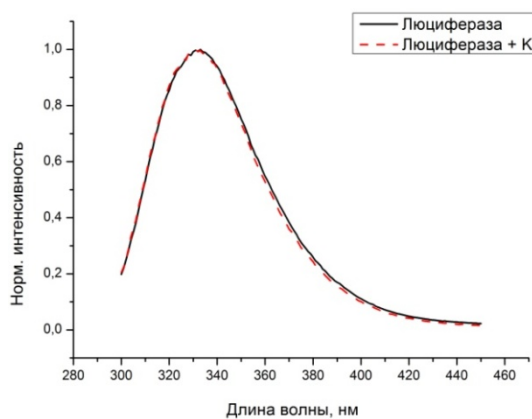


Рис. 3. Нормированный спектр флуоресценции люциферазы в отсутствие и присутствии KI

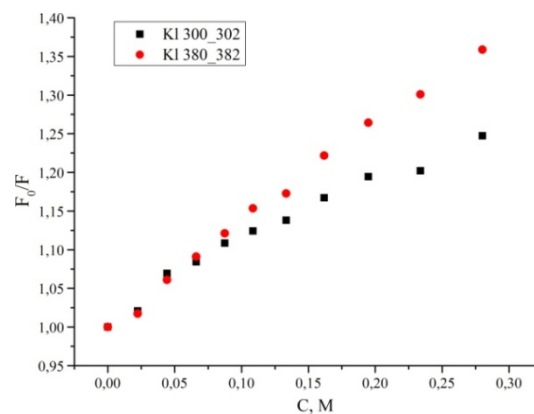


Рис. 4. Тушение флуоресценции люциферазы ионами I<sup>-</sup>

В присутствии акриламида падение квантового выхода при максимальном добавлении составляет 71 % (рис. 5). Наблюдается смещение всего контура флуоресценции влево, а также уменьшение его полуширины на 4 нм. При этом правый край контура, соответствующий экспонированным триптофанам, смещается налево на 5,4 нм, а левый край контура, соответствующий погруженным триптофанам, на 2,6 нм. Изменение положения максимума флуоресценции составляет 4 нм. Общее смещение контура говорит о влиянии акриламида как на экспонированные триптофаны, так и на погруженные в матрицу белка.

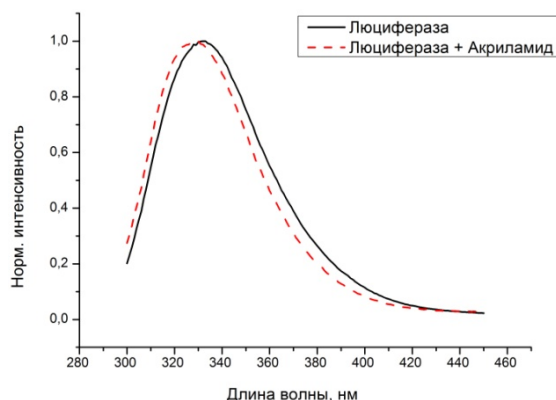


Рис. 5. Нормированный спектр флуоресценции люциферазы в отсутствие и присутствии акриламида

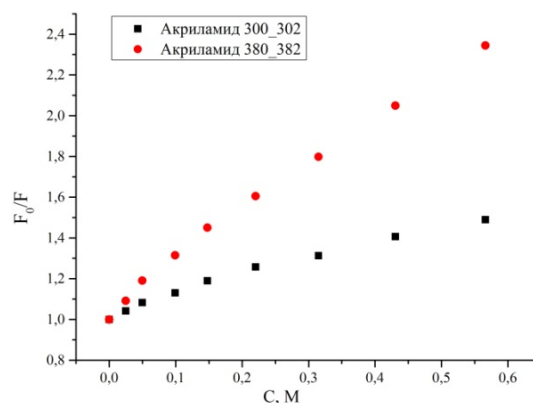


Рис. 6. Тушение люциферазы акриламидом

Из литературных источников известно, что максимальной тушащей способностью обладает кислород, который также как и акриламид является нейтральным тушителем. При этом способность эффективно тушить как внешние, так и внутренние триптофаны обуславливается размером молекулы. Химическая формула акриламида –  $\text{CH}_2\text{CHCONH}_2$ , логично предположить, что его проникающая способность внутрь белка ниже, чем у кислорода. Тем не менее, полученные в эксперименте данные говорят о влиянии акриламида на внутренние хромофоры. Туше-

ние внутренних остатков, с одной стороны, может быть объяснено масштабными флуктуациями или локальным разворачиванием белка, с другой стороны, современные литературные данные говорят о способности акриламида влиять на возбужденные флуорофоры, погруженные в белок на глубину не более 3 Å (рис. 6).

Были рассчитаны параметры тушения внутренних и внешних триптофановых остатков в составе люциферазы (см. таблицу). Получено, что степень воздействия тушителей на флуорофоры в белке увеличивается в ряду CsCl→KI→акриламид. Соответственно, константы  $K_{sv}$  имеют наибольшее значение для акриламида. При этом эффективность тушения для акриламида составляет около 10 % и сходна с данным значением для ионов цезия.

**Таблица.** Параметры влияния тушителей на внешние, внутренние триптофаны и на суммарный квантовый выход флуоресценции люциферазы

Тушитель	Акриламид	KI	CsCl
	$K_{sv}$	$K_{sv}$	$K_{sv}$
Внутренние Тгр люциферазы	$1,3 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$	$0,29 \pm 0,04$
Внешние Тгр люциферазы	$3,2 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,1$	
Триптофан в воде	$21 \pm 3^*$	$9,1^{**}$	$2,8^{**}$
Эффективность тушения, $\gamma$	0,103	0,154	0,104

\*Tallmadge et al., 1989

\*\* Пермяков, 2003

## Выводы

Анализ полученных данных позволяет утверждать:

- 1) изменение ионной силы раствора до 0,5 М не влияет на форму спектра флуоресценции люциферазы, что говорит о неизменности конформации фермента;
- 2) эффективность тушения флуоресценции внешних триптофанов в структуре люциферазы по отношению к воде максимальна для ионов йода (15 %), а для ионов цезия и акриламида составляет около 10 %;
- 3) в области локализации триптофанов бактериальной люциферазы, экспонированных в среду, вероятно присутствуют положительно заряженные группы, препятствующие приближению к ним ионов цезия;
- 4) эффективность тушения внешних триптофанов акриламидом может понижать стерический фактор, поскольку этот тушитель имеет самый большой размер.

# **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ**

УДК 004.42

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ, ТРЕНАЖЕРА-ЭМУЛЯТОРА, ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

**М.Г. Герасимчук**

**Научный руководитель старший преподаватель Л.В. Макуха**

*Сибирский федеральный университет*

На текущий момент дистанционное обучение все глубже интегрируется в процесс образования как студентов, так и школьников, в связи с этим возникают потребности развития и создания ресурсов, обеспечивающих выполнение данной задачи. В сфере информационных технологий количество наработок как веб-тренажеров, так и локальных достаточно велико, но есть и те дисциплины, которые требуют создания специальных обучающих и тестирующих систем.

Дисциплины, целью которых является проверка умений студента работать со стандартными консолями управления и конфигурирования систем, нуждаются в подобных тренажерах. Процесс проверки знаний студента преподавателем можно автоматизировать путем разработки приложения, которое бы служило эмулятором рабочей среды системы, в которой выполняются работы по той или иной дисциплине. Данное приложение должно отвечать следующим требованиям:

- работа приложения должна осуществляться в двух режимах:
  - 1) режим обучения;
  - 2) режим тестирования;
- сбор подробной статистики результата работы с эмулятором по каждому тестируемому и запись результатов в базу данных;
- эмулирование командной строки;
- простота конфигурирования;
- возможность импорта исходных данных.

Исходя из параметров приложения наилучшей альтернативой является веб-приложение. В качестве языка для разработки выбран *ActionScript* и платформа *Adobe Flash*, критериями выбора были простота интегрирования в веб-страницу, наличие большого количества материала по данной среде разработки и различных примеров на данной платформе, также немаловажным критерием выбора была возможность работы *ActionScript* с любыми базами данных. На рис. 1 представлена структурная схема приложения, содержащая функциональные блоки.

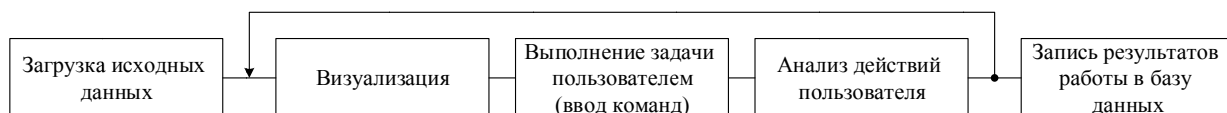


Рис. 1. Структурная схема тренажера-эмулятора

Блок «Загрузка исходных данных» обеспечивает импорт данных на этапе загрузки приложения и инициализацию объектов системы. Блок «Визуализация» инициализирует интерфейс тренажера-эмулятора, отображает задание, подсказки в обучающем режиме работы, инициализирует эмулятор консоли конфигурирования системы, используемый пользователем для выполнения задач. В процессе выполнения задания пользователем параллельно работает блок анализа действий пользователя, он собирает информацию о действии пользователя при вводе команд, о времени затраченном на выполнение подзадач, и фиксирует ошибки пользователя, а в дальнейшем записывает их в базу данных.

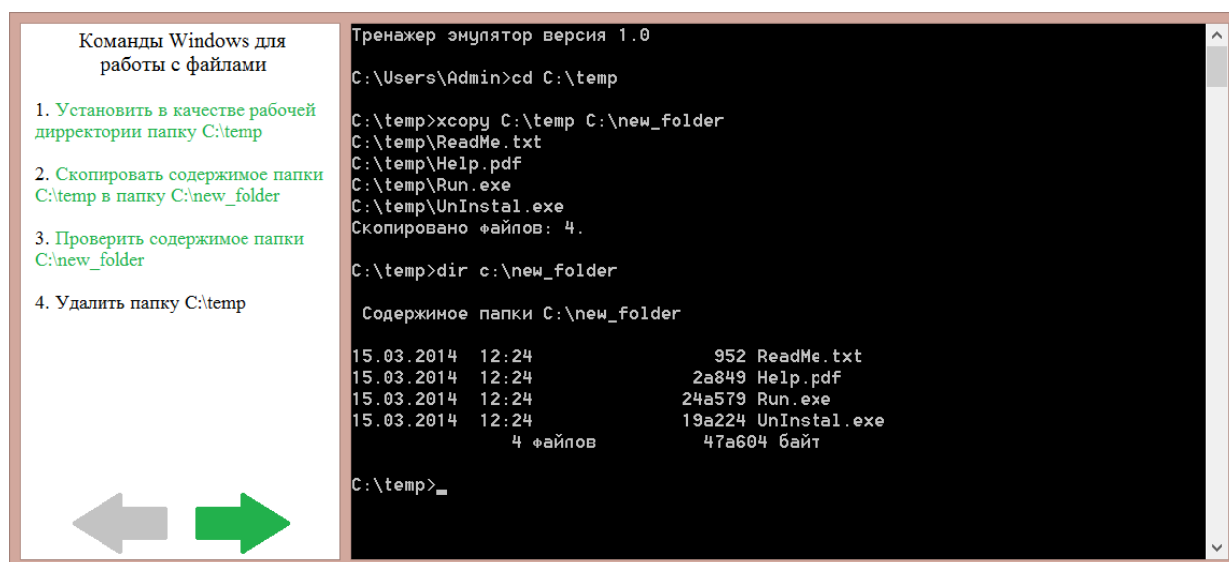


Рис. 2. Общий вид тренажера-эмулятора в режиме тестирования

Область тренажера-эмулятора состоит из области «Задания» и «Рабочей области» (рис. 2), в области задания отражается информация о текущем задании, так же в данной области расположены стрелки навигации между заданиями, если их несколько. Рабочая область предназначена для ввода пользователем команд, интерфейс рабочей области максимально повторяет стандартную консоль конфигурирования системы, в которой выполняется задание. В обучающем режиме в области задания выводятся подсказки для корректного ввода команд в консоли.

Тренажер-эмулятор имеет различные представления рабочей области и базу функций для работы в консоли в соответствии с заданной операционной системой, тренажер-эмулятор поддерживает эмулирование консоли операционных систем Windows и Linux.

## **ОДНОКРИСТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**А.С. Правитель**

**Научный руководитель канд. техн. наук О.В. Непомнящий**

*Сибирский федеральный университет*

*Рассмотрена проблема повышения устойчивости радиоэлектронной аппаратуры специального назначения к основным дестабилизирующим факторам. Предложено решение повышения надежности и унификации цифровых систем управления, базирующихся на сверхбольших интегральных схемах. Решение основывается на применении принципа динамической реконфигурации тактовых доменов программируемых логических интегральных схем. Изложены результаты практического применения предложенного метода для реализации контроллера управления двигателем. Намечены перспективные пути повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры за счет использования интегральных схем с динамически реконфигурируемой архитектурой.*

В сложных системах, проектируемых для нужд космической, авиационной и оборонной промышленности, используют радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) специального назначения. К такой аппаратуре предъявляются крайне высокие требования по обеспечению устойчивости, поскольку электронные модули специального назначения должны сохранять свою работоспособность или восстанавливать её в течении заданного отрезка времени.

Однокристальные вычислительные системы, входящие в состав специализированной РЭА, функционируют в сложных условиях космического пространства (КП) или в районах ведения боевых действий, подвергаются комплексному воздействию дестабилизирующих факторов (ДФ). К основным ДФ относят [1]: вибрации, перепады температур, линейные нагрузки, ионизирующее излучение. Среди вышеперечисленных ДФ наибольший негативный эффект наблюдается при воздействии ионизирующего излучения (ИИ) [2]. Под действием ИИ в интегральных схемах наблюдаются два вида отказов: одни происходят в результате накопления соответствующей дозы радиации, другие – в результате попадания высокоэнергетической частицы (космические лучи, протоны, электроны, альфа-частицы, термические нейтроны и т. д.). К первому типу относятся рост задержек элементов или изменение логических уровней интегральных схем. Второй тип отказов принято называть одиночными сбоями (SEE). К SEE относят: изменение состояния регистра памяти, кратковременное изменение уровня на выходе логического элемента и др.

Обеспечение высокой надёжности и стойкости к ДФ достигается за счёт применения комплекса мер на всех этапах проектирования и подготовки. В част-

ности применяют технологические, схемотехнические, конструктивные решения, при этом на этапах верификации и предварительных испытаний конечных устройств выполняют симуляцию и моделирование воздействия ДФ. Кроме того, обеспечение надежности состоит не только в защите от внешних, но и от внутренних дестабилизирующих воздействий. К внутренним дестабилизирующим воздействиям относятся ошибки в аппаратном и программном обеспечении, которые не были устранены на этапе проектирования, не были обнаружены при испытаниях или были внесены на этапе производства электронных средств. Наличие таких ошибок является вполне объективным фактором, который принципиально нельзя исключать из рассмотрения ввиду высокой сложности сверхбольших интегральных схем (СБИС), входящих в состав современной РЭА.

Однако, при реализации электронных систем управления (ЭСУ) на основе аналоговой или цифровой элементной базы малой степени интеграции большинство подходов приводят к увеличению массогабаритных характеристик, росту собственного энергопотребления оборудования и увеличению задержек внутри схемы.

Применение в составе РЭА СБИС и систем на кристалле (СнК) с одной стороны способствует решению вышеизложенных проблем, однако при этом возникают дополнительные требования к устойчивости СБИС, поскольку даже частичный выход из строя однокристалльного вычислителя приводит к невосполнимым потерям.

Таким образом, требуется разработка новых методов системной организации, верификации и тестирования СБИС для РЭА ответственного применения.

Появление высокопроизводительных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), имеющих встроенные на кристалл системы динамической реконфигурации, способно изменить ситуацию [3].

Для обеспечения должного уровня противодействия ДФ система, функционирующая в режиме динамической реконфигурации, может изменять содержимое ПЛИС в определенные интервалы времени с целью восстановления ячеек в результате сбоев. При использовании динамической реконфигурации кристалл способен менять свою внутреннюю логическую структуру в режиме реального времени за время, значительно меньшее времени выполнения вычислительных задач, между которыми происходила смена структуры. Требования к значению времени реконфигурирования динамически реконфигурируемой системы (ДРС) могут меняться во время работы устройства.

В плане унификации система управления, помимо высокой надежности, должна обеспечивать максимальную универсальность, что позволит использовать одну и ту же СБИС для различных задач. Для обеспечения универсальности при модульном построении РЭА также возможно изменение внутренней архитектуры СБИС непосредственно в процессе функционирования.

ДРС состоит как минимум из двух базовых элементов:

- динамически реконфигурируемого модуля (вычислителя), который предназначен для реализации вычислительных операций и основной элементной базой которого на сегодняшний день являются ДР ПЛИС;
- управляющего модуля (контроллера), в котором реализуются основные операции управления и специальная операция загрузки конфигурационного

файла в динамически реконфигурируемый модуль из произвольного места в памяти. Таким образом, контроллер фактически представляет собой процессор, функциональный базис которого может быть неполным (могут отсутствовать все вычислительные операции, кроме тех, которые необходимы при работе с памятью).

С целью практической реализации системы с динамической реконфигурацией авторами разработан лабораторный образец контроллера управления синхронного двигателя с электромагнитной редукцией (СДЭР), применяющегося в составе модуля раскрытия антенны в рабочее положение.

При разработке контроллера предложена магистрально-модульная архитектура центрального вычислителя с динамической реконфигурацией. В целях повышения надежности системы и предотвращения изменения состояния регистров памяти вследствие одиночных сбоев в разрабатываемом контроллере использован метод тройного резервирования на уровне процессора. Следует отметить, что каждый процессорный блок является реконфигурируемым модулем и находится в реконфигурируемых доменах ПЛИС. Благодаря этому имеется возможность восстановления поврежденного в результате ДФ процессорного ядра путем перезаписи содержимого соответствующего домена ПЛИС.

Контроллер памяти представляет собой систему, состоящую из контроллера конфигурационной внешней памяти и контроллера общей для всех процессорных ядер оперативной памяти, при этом вся система вынесена за пределы процессорного блока. Это решение основывается на следующих предпосылках. Во-первых, при таком подходе контроллер памяти может быть организован как самонастраивающаяся адаптивная система с триплированием на архитектурном уровне и физически реализован на отдельном кристалле повышенной степени защиты от ДФ. Во-вторых, это упрощает архитектуру процессорного модуля и положительно сказывается на ресурсных ограничениях ПЛИС, поскольку процессорные блоки обращаются к контроллеру памяти через шину *Avalon* и мажоритарную схему. При этом оперативная память является общей для всех процессоров, т. е. для каждого процессора нет необходимости в организации собственной памяти и, как следствие, исключается дополнительный арбитр шин. В-третьих, при использовании единой внешней оперативной памяти с динамическим режимом функционирования наличие одного контроллера является обязательным условием, поскольку в противном случае необходимо организовывать для каждого модуля оперативной памяти свой собственный контроллер.

В состав вычислителя входят три ядра процессора программного процессора *Nios II* с общей внешней кэш памятью, а также контроллер магистрали в стандарте *Avalon*. При этом ядра вычислителя сопрягаются с памятью посредством мажоритарной схемы. Следует отметить, что в данном случае количество процессорных ядер, входящих в состав контроллера, ограничивается только ресурсами ПЛИС. Кроме того, для обеспечения устойчивости к одиночным сбоям не только контроллеры памяти и контроллеры ввода-вывода также организованы по схеме с тройным резервированием.

Контроллер динамической реконфигурации (управляющий модуль) выполняет функцию начальной инициализации, а также осуществляет динамическую



реконфигурацию ПЛИС в случае обнаружения мажоритарными схемами несоответствия выходных данных памяти или периферийной системы для определённого процессора в случае сбоя. В разработанной системе все вычислители обмениваются информацией с внешними блоками через мажоритарную схему – это позволяет уменьшить количество ошибок, возникших в результате сбоя аппаратной части, однако не избавляет от ошибок на алгоритмическом уровне. Для обнаружения ошибок перед каждым входом в мажоритарную схему генерируется уникальная контрольная подпись для данных, прошедших через этот блок. Подпись короче, чем поток данных, следовательно, проще и быстрее для сравнения. Если какая-либо подпись отличается от других (т. е. данные отличаются), даже если эта ошибка будет исправлена на выходе мажоритарной схемы, управляющий модуль инициируется к принятию мер, так как ошибка могла быть вызвана неисправной конфигурацией процессора. Флаг ошибки содержит информацию о номере поврежденного вычислителя, который должен быть проверен на соответствие содержимому конфигурационной памяти, переконфигурирован и перезапущен.

В лабораторном макете контроллер динамической реконфигурации (управляющий модуль) типологически размещен в отдельном секторе кристалла. Однако при практической реализации он изготавливается в виде специализированной заказной микросхемы (ASIC) с повышенным уровнем защиты от ДФ, например, на базе кристалла, изготовленного по технологии наращиваемых перемычек – *Antifuse*. Ядром контроллера памяти является не отдельный процессор с собственной памятью, а конечный автомат, обладающий необходимым и достаточным набором функций управления. Сопряжение модуля реконфигурации с ПЛИС осуществляется посредством стандартизированного интерфейса ICAP.

При реализации проекта разработан код контроллера конфигурационной памяти для ПЛИС на языке *Verilog*. В состав контроллера входят: делитель тактовой частоты, блок формирования импульса реконфигурации необходимой длины, конечный автомат и стандартный IP-модуль, входящий в состав *Altera Quartus II*.

Делитель тактовой частоты преобразует опорную тактовую частоту в частоту, необходимую для корректного функционирования IP-модуля и разработанного конечного автомата. IP-модуль формирует сигналы, которые необходимы для реконфигурации ПЛИС. Также в состав IP-модуля входит *watchdog* таймер, который по окончании счёта производит реконфигурацию устройства. Конечный автомат настраивает IP-модуль на необходимый режим работы и задаёт адрес конфигурации, хранящейся во *flash* памяти. Кроме того, после каждой реконфигурации автомат считывает с шины данных информацию и сигнализирует о том, что вызвало конфигурацию ПЛИС: начальная загрузка, окончание счёта *watchdog* таймера, внешнее прерывание.

## Выводы

В результате проведенных исследований предложен подход к архитектурной организации самовосстанавливающихся однокристалльных систем, базирующийся на принципе динамической реконфигурации тактовых доменов. Кроме того, предложенный подход позволяет унифицировать и расширить функциональные возможности РЭА путем автоматической настройки и адаптации на текущий

класс решаемых задач за счет изменения топологии управляющей ПЛИС непосредственно в процессе функционирования.

Разработанная архитектура и функциональный состав однокристалльного вычислителя для лабораторного образца контроллера управления двигателем наглядно демонстрирует возможность реализации означенных систем. При этом полученные результаты тестирования контроллера в полушаговом режиме управления двигателем позволяют отметить, что реконфигурация ПЛИС происходит за время, значительно меньшее времени формирования импульсов управления. То есть обеспечивается режим реального времени.

Переход от лабораторного образца к практическому применению предложенного подхода может осуществляться различными путями. Например, путем замены промышленного процессорного ядра *Nios II* на специализированное ядро *Leon 3 FT* и целевого кристалла *Altera Stratix IV* на кристалл для специальных применений из серии *Virtex 5 QV* от компании *Xilinx*.

Следует отметить, что в случае реализации систем реального времени применение предложенного подхода ограничивается тактовой частотой FPGA и скоростью поступления информационных потоков. Однако и в этом случае решение может быть найдено при динамическом распараллеливании поступающих данных.

#### **Список литературы**

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004.
2. Юдинцев В. Радиационно стойкие интегральные схемы. Надёжность в космосе и на земле. ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2007. № 5.
3. Филиппов А. К. Высоконадежные динамически реконфигурируемые системы обработки информации для ответственных применений. Проектирование и технология электронных средств. 2008. № 2. С. 2–9.

УДК 004.052

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НА НЕБЕЗОПАСНЫХ ЯЗЫКАХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ЯЗЫКА C)**

**И.А. Якимов**

**Научный руководитель канд. техн. наук А.С. Кузнецов**

*Сибирский федеральный университет*

#### **Введение**

Для облегчения процесса тестирования создаются библиотеки и статические анализаторы, генераторы тестов по спецификациям, которые будут рассмотрены ниже.

После рассмотрения существующих подходов будет описан инструмент, предлагаемый к разработке. В качестве целевого языка выбран C99, который на данный момент используется в основном во встраиваемых системах.

Следует отметить, что проведение тестирования не является достаточным для доказательства верности работы программы, но хорошее тестирование может устранить большинство наиболее опасных ошибок [1].

### **Статический анализ без формальных спецификаций**

Статические анализаторы без формальных спецификаций, например *Cppcheck*, *svace*, позволяют проверять программу еще до ее запуска, опираясь исключительно на исходные коды. Они покрывают задачи проверки надежности и безопасности.

Статические анализаторы просты в применении – программисту не нужно писать дополнительный код для выявления ошибок. Но такой подход сужает круг решаемых задач, в частности, тестирование логики становится невозможным.

### **Тестирование на основе модели**

Существуют системы тестирования на основе формальных спецификаций (моделей), например CTESK, реализующий технологию UniTESK.

Существенных ограничений на свойства тестируемого программного обеспечения нет. Однако применение CTESK наиболее эффективно при тестировании прикладных программных интерфейсов систем. В других случаях задача решается путем разработки промежуточного слоя программного обеспечения и применения CTESK к его прикладному интерфейсу [2].

В общем случае описание подобных спецификаций является задачей нетривиальной и, как показывает практика, многие программисты предпочитают использовать библиотеки модульного тестирования и обычные статические анализаторы.

### **Модульные тесты**

Примерами «фреймворков» для модульного тестирования могут, служит, например *CUnit*, *mockery*. Стратегией модульного тестирования является написание специальных процедур для проверки модулей программы. При этом средства создания модульных тестов, которые зачастую представлены в форме подключаемых к проекту библиотек, не используют информацию о структуре программы.

Преимуществом модульных тестов является простота использования, но прописывать их приходится вручную, на языке целевой программы (который изначально разработан для других целей), что, в конечном счете, сводится к рутинной однообразной работе. Именно этот процесс и предполагается автоматизировать.

### **Постановка задачи**

После рассмотрения наиболее распространенных подходов к тестированию можно приступить к описанию проектируемой системы, которая должна:

- позволять тестировать логику, надежность, целостность;

- анализировать исходный код программы для генерации или проверки тестовых случаев;
- позволять описывать тестовые случаи простым и интуитивно понятным способом.

Таким образом, от анализа сложившейся ситуации и выработки требований мы можем перейти к вопросам реализации.

### **Единица трансляции**

Прежде чем перейти к вопросам реализации, необходимо рассмотреть вопрос о том, что такое единица трансляции. Она состоит из последовательности внешних объявлений, каждое из которых представляет собой либо объявление, либо определение функции [3].

### **Стратегия автоматизации**

Для автоматической генерации может быть выбрана следующая стратегия: генерация отдельной единицы трансляции для тестов, которая, будучи скомпилированной отдельно от тестируемого блока программы, объединяется с ним при помощи компоновщика.

Система анализирует код тестируемого модуля и генерирует входные данные так, чтобы тесты прошли все возможные потоки выполнения. Но при этом верификации операторов не происходит. Анализатор только генерирует входные данные. Программист сам задает поведение функции посредством таблицы, которая кратко описана дальше. Возможен и альтернативный подход – в этом случае анализатор выступает в роли некой экспертной системы, которая выдает предупреждение в случае, если программист описал недостаточное количество входных данных для тестирования всех возможных путей выполнения.

### **Специализированный язык**

Очевидно, что для разрабатываемой системы нужен внутренний язык. Существует множество языков-сценариев, которые можно встраивать в приложения (*Lua*, *JavaScript* и т. д.). Но т. к. задача тестирования в корне отличается от написания пользовательских программ, то разумным решением будет создание специализированного языка описания тестов, полностью отвечающего поставленной цели.

### **Объекты тестирования**

Язык С является процедурным. Поэтому объектами модульного тестирования должны служить процедуры (функции). О них речь и пойдет дальше.

### **Табличные функции**

По аналогии с математикой, функцию как объект тестирования, можно задать таблично.

$F: \{\{I_1, O_1\}, \{I_2, O_2\}, \dots, \{I_n, O_n\}\},$

$I: \{\{\text{параметр1, параметр2} \dots\}, \{\text{глобальная\_переменная1,} \dots\}\},$

$O: \{\{\text{возврат}\}, \{\text{выходной\_параметр1,} \dots\}, \{\text{глобальная\_переменная1,} \dots\}\}.$

$F$  – имя функции,  $I$  – вход,  $O$  – выход.

То есть для каждой тестируемой функции описывается ее поведение для ряда случаев, определяемых посредством входным параметров. При этом глобальные переменные также рассматриваются как входные параметры. Система должна проверить соответствие функции, написанной программистом, функции, заданной таблично.

Таблицы могут использоваться в двух случаях.

Для генерации тестов, в данном варианте каждый тестовый случай соответствует очередной строке таблицы.

Для генерации функций-заглушек, речь о которых пойдет далее.

*Bison* – подобная нотация описания синтаксиса строки таблицы:

```
table_row:
    param_list
    "=>"
    value
    param_list
    ','
    ;
param_list:
    NAME '=' value ',' param_list
    | NAME '=' value
    |
    ;
```

### Пример описания таблицы

В качестве примера табличного описания функции возьмем функцию возведения в степень.

```
pow(int x, int n)
{
    int i = 0;
    if (n < 0) return -1;
    if (x == 0 && n == 0) return -1;
    if (x != 0 && n == 0) return 1;
    for (i; i < n; i++)
        x*=x;
    return x;
}
```

Описание таблицы на декларативном языке:

```
pow:
x = 0, n = -1 => -1;
x = 0, n = 0 => -1;
x = 2, n = 0 => 1;
x = 2, n = 2 => 4.
```

### Корректность начального состояния

Для корректности выполнения тестов нужно реализовать процедуру инициализации (сброса) состояния программы перед запуском очередного теста, т. е., например, если тестируемая функция изменяет глобальную переменную, то перед

тестированием следующей функции нужно привести программу (модуль) к состоянию по умолчанию либо состоянию, заданному пользователем. Такое описание состояния должно поддерживаться встроенным языком системы.

#### Независимое тестирование модулей

Для обеспечения независимого тестирования модулей можно реализовать механизм формирования фиктивных функций. Распространенным подходом является использование *mock*-функций [4], которые работают по принципу очереди, т. е. программист прописывает для каждого теста перед вызовом тестируемой функции, посредством вызова функции *will\_return* (на примере *google mockery*) нужное значение возврата для функций-заглушек в порядке их следования в тестируемой функции. Таблицы функций реализуют схожее поведение, но иным образом, в данном случае жестко прописывать порядок не нужно.

Пусть, например, имеется функция *function*, которая вызывает внешнюю функцию *sub\_function*.

```
<тип> function(...)
{
    extern sub_function(...);
    ...
    sub_function(...);
    ...
}
```

Пусть пользователь хочет протестировать *function*, независимо от *sub\_function*. В этом случае система ищет таблицу, определенную для *sub\_function*, и генерирует заглушку. Далее тестируемый модуль компонуется с объектным файлом, содержащим фиктивную функцию вместо реальной.

#### Проблема указателей неизвестного типа

Подходя к концу, хотелось бы коротко охарактеризовать проблему, свойственную языку С и ему подобным.

Работа с указателями являет собой некоторую сложность. Мы можем проверять значение переменной, на которую ссылается указатель, если он образован от базового или пользовательского типа. Но существует частный случай указателей – *void\**, тип которых не определен. В этом случае структура программного объекта, на который он ссылается, неизвестна. Система тестирования должна располагать средствами добавления метаинформации о структуре типов, на которые он указывает. Однако следует помнить, что указатели *void\** зачастую используются для имитации наследования, которое отсутствует в языке С в явном виде. Эту проблему можно решить, если ввести возможность описания наследования пользовательских типов (структур и объединений), на которые ссылается *void\** в языке системы.

#### Заключение

В результате исследования был выработан подход к созданию системы автоматической генерации тестов. Были определены цели, описаны ключевые кон-

цепции. Дальнейшая работа будет направлена на поиск, синтез и обоснование алгоритмов анализа исходных текстов, генерации таблиц функций и, на их основе, непосредственно тестов. Также планируется произвести поиск дополнительных путей автоматизации процесса модульного тестирования.

#### **Список литературы**

1. Стив МакКонел. Совершенный код.
2. <http://www.unitesk.ru>.
3. Брайан Керниган, Деннис Ритчи. Программирование на С.
4. <http://cmockery.googlecode.com>.

## **ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ**

УДК 553.8

### **ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ПРИЧИНЫ РАЗНООБРАЗИЯ ЯШМ**

**А.В. Бураченко**

**Научный руководитель канд. геол.- минерал. наук Е.А. Звягина**

*Сибирский федеральный университет*

Красота яшмы – свидетельство богатства и щедрости природы. Изделия из неё – воплощение мастерства, трудолюбия и духовности человека. По словам В.Б. Семенова, созерцая яшму, попадаешь под «настроение» её колорита, видишь и читаешь в ней что-то своё, личное – настолько богата цепь причудливых ассоциаций, которые неизменно рождаются при встрече с этим камнем. Но не только разнообразие красок является достоинством этого камня, а еще и плотность, однородность, необычайная твердость, подлинная «вечность» материала, крупные размеры монолитов и, наконец, грандиозность запасов. По данному описанию мы можем наглядно представить этот минерал.

Согласно геологической терминологии яшма (пестрый или крапчатый камень) – скрытокристаллическая горная порода, сложенная в основном кварцем, халцедоном и пигментированная примесями других минералов (эпидот, актинолит, хлорит, слюда, пирит и др.), некоторые разновидности богаты полевым шпатом.

#### **Физико-химические свойства**

С точки зрения физических и химических свойств и особенностей, яшма является кремнистой массивной и очень плотной породой осадочного происхож-

дения. Она непрозрачна, сложена зернами кварца, спаянными кремнистым цементом, иногда с примесью халцедона, окрашена преимущественно оксидами железа и марганца в различные цвета. Химический состав яшм таков:  $\text{SiO}_2$  – 80–95 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – до 15 %,  $\text{CaO}_3$  – 6 %.

Нередко в литературе ее описывают как типичный минерал, который относится к классу силикатов. Непрозрачен. Цвет – черный, белый, разнообразные оттенки всех цветов радуги. Блеск – от стеклянного до воскового, шелковистый. Спайность – отсутствует. Сингония – триклинная. Твердость – 6,6–7,0. Плотность – 2,6 г/см<sup>3</sup>. Излом – ровный, переходящий в раковистый.

### **Классификация**

Разнообразие яшм настолько велико, что даже сегодня четкая классификация всех разновидностей минерала представляется затруднительной. Различные виды яшм по мере их открытия получали русские названия: палевая, празеленая (иссиня-зеленая), печенковая, белая, однородная, пестроцветная (по окраске); брекчиевая, флюидальная, ситцевая, концентрическая, пятнистая (по текстуре); ленточная, крапчатая, полосчатая, штриховая, мозаичная (по рисунку). Шалимовская яшма названа по имени первооткрывателя.

Изредка бытовали народные названия: например, «коломенковая» – от слова «коломянка» (так называли материю палевого цвета), или по местности – кошкульдинская (царица уральских ленточных яшм в первых мозаиках), ямская и маломуйнаковская, аушкульская (дендритовая).

### **Происхождение**

Тайной рождения этого камня геологи заинтересовались давно, еще в XVIII–XIX столетиях. Источником образования яшмы служат кремнистая вулканогенно-осадочная порода, метаморфизованная в условиях фации зеленых сланцев. В составе таких толщ распространены протяжные пласты железистых сургучных яшм, возникших в результате метаморфизма кремнистых морских осадков. Красочные яшмы образованы в результате перекристаллизации и окварцевания первичных сургучных и других однотонных яшм в зонах трещиноватости или у контактов с магматическими породами.

Образную картину генезиса яшмы нарисовал в своё время академик А.Е. Ферсман: «Несколько сот миллионов лет назад, в так называемый девонский период не было современного уральского кряжа. То мелководье, то более глубокое море с отдельными островами покрывало те места, где сейчас высятся горные хребты Южного Урала. Не было еще следов горообразующей деятельности, но уже изливались лавы, подводные извержения нарушили спокойную картину девонского моря. На морском дне, заливаемом лавами, обитала фауна в виде разнообразных животных с кремнистым скелетом – губки и радиолярии. В сложном химическом процессе накапливались их остатки, на дне образуя целые слои кремнистого ила – будущей яшмы».

### **Месторождения**

Прошли многие миллионы лет, и мощные процессы горообразования положили начало Уральскому хребту, а вместе с ним и яшме. Яшмовый пояс тянется



по восточному склону Урала, имея протяженность 1200 км. Его можно сравнить с ожерельем, так как месторождения яшм располагаются не сплошной полосой, а обособленными районами. Половина мировых запасов яшм приходится на долю Урала: от Приполярья до Кавказских степей и Мугоджарских гор. Пока геологи насчитывают в 12 таких регионах 207 месторождений яшм. Ею щедро одарены пустыни Нубии, Египта, горы Азии, Северная Америка, Индия, Венесуэла. Основные месторождения уральской яшмы: Анастасьевское, Кушкудинское, Маломуйнаковское, Науразовское, Гора Полковник, Сафаровское, Тунгатаровское.

### **Художественная ценность**

С точки зрения геолога ценность яшмы невелика, так как она представляет собой сильно загрязненный кварц (до 40 % от общей массы). Даже самая однородная яшма в десятой своей части состоит из посторонних примесей. Однако именно инородные включения делают её красивой и ценной. Яшму ценили ремесленники Древнего и Античного мира, Средневековье увидело в яшме прежде всего предмет роскоши. В сырье и в изделиях она перевозилась на огромные расстояния в составе посольских и свадебных даров, в числе военных трофеев. Она вошла в убранство церквей, церковной утвари, одежды священнослужителей. Первые изделия России – колонны, исполненные тобольскими камнерезами, и украшения для сбруи парадной упряжки к выезду сибирского губернатора. В XX в. изделия из яшмы стоили дорого и вызывали живейший интерес на аукционах: в 20-х гг. яшма значилась среди цветных камней первого класса. Теперь она занимает первое место среди поделочных камней.

### **Заключение**

В данной работе сделан обзор литературы по вопросам классификации, происхождения, химического и минерального состава яшм, рассмотрены их текстурно-структурные особенности, затронуты вопросы закономерностей размещения месторождений и проявлений, а также причины разнообразия яшм и их художественная ценность. Подобрана коллекция различных видов яшм и проведена их диагностика. На наш взгляд, яшма не является минеральным видом, а представляет собой горную породу метаморфогенного происхождения. Разнообразие внешнего облика этого камня обусловлено его длительной геологической историей и многообразием исходных пород. Именно по причине разнообразия яшм и условий их проявления многие проблемы, касающиеся их генетических особенностей и их места в классификационной иерархии горных пород, до сих пор остаются открытыми и требуют дальнейшего изучения.

### **Список литературы**

1. Семенов В.Б. Яшма. Средне-уральское книжное издательство, 1979.
2. Ахметова Г.Л., Ахметов С.Ф. От авантюрина до яшмы. М.: Знание, 1990.
3. <http://www.inmoment.ru/magic/healing/jasper.html>.
4. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D1%88%D0%BC%D0%B0>.

## КОЛЛЕКЦИЯ МЕТЕОРИТОВ НАШЕГО ИНСТИТУТА

Б.М. Лобастов, В.А. Бумагин

Научный руководитель канд. геол.-минерал. наук О.Ю. Перфилова

*Сибирский федеральный университет*

15 февраля 2013 года произошло событие, которое потрясло весь мир. Около 9:20 утра по местному времени в Челябинской области произошло падение метеорита. Это, конечно же, вызвало большой интерес у огромного числа исследователей. И мы постарались не остаться в стороне, тем более, что нам в руки попали образцы этого метеорита для исследований. Впрочем, наш интерес разросся, нас заинтересовали метеориты в общем. Мы изучили классификацию метеоритов, а так же описали имеющиеся у нас образцы метеоритного вещества из коллекции.

Что же такое метеорит? Метеорит – твёрдое тело естественного происхождения, упавшее на поверхность другого крупного космического тела. Не стоит путать метеориты с метеорами, метеор – это явление, возникающее при сгорании в атмосфере Земли мелких метеорных тел. Если метеор очень яркий, его называют болидом. Все метеориты делятся на три большие группы: каменные, железо-каменные и железные метеориты. Среди каменных метеоритов выделяются хондриты и ахондриты, хондриты в свою очередь делятся ещё на три группы: углистые, обыкновенные и энстатитовые хондриты. Более 90 % всех метеоритов составляют каменные метеориты. Железо-каменные метеориты разделяются на палласиты и мезосидериты. Такие метеориты очень редки, количество их падений не превышает 1,5 %.

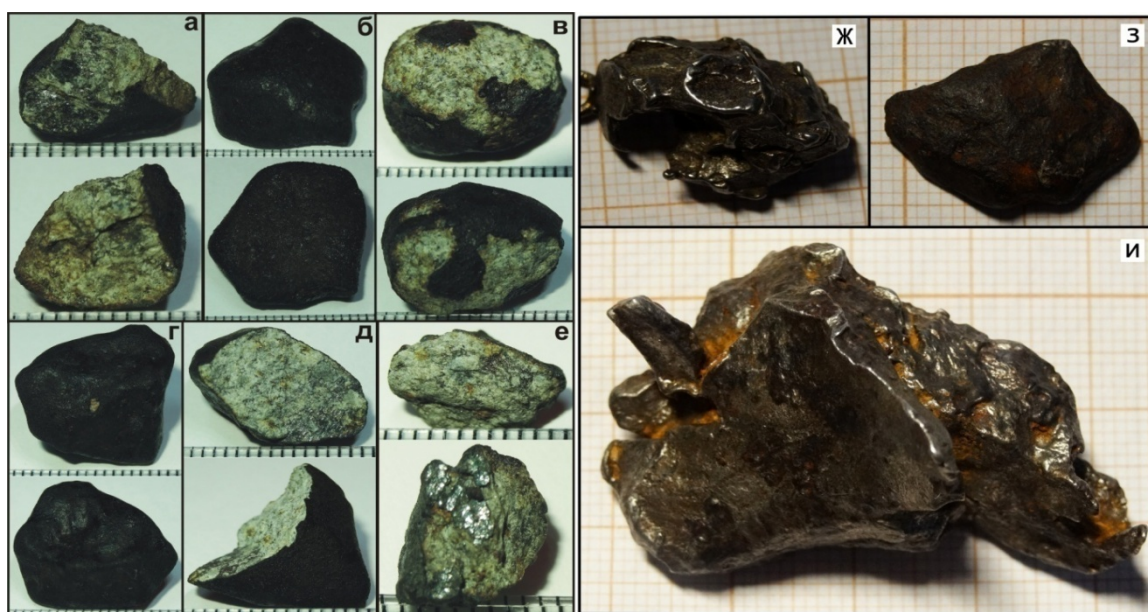


Рис. 1. Метеориты: Челябинск (а–е), Кампо-дель-Сьело (ж), Каньон Дьябло (з), Сихотэ-Алинь (и)

Метеориты классифицируются по составу, по структурно-текстурным особенностям, по иным характерным особенностям. Классификация громоздкая, поэтому мы её не приводим в статье, лишь воспользуемся её основами и приведём классификационное положение каждого метеорита по литературным данным. И теперь, когда мы знаем, что такое метеорит, какими они бывают и как классифицируются, можно перейти к описанию образцов метеоритного вещества, имеющих в нашей коллекции. Каменные метеориты: метеорит Челябинск. Железные метеориты: Сихотэ-Алинский метеорит, Кампо-дель-Сьело (Campo del Cielo), Каньон Дьябло (Canyon Diablo).

### **Метеорит Челябинск**

Упал 15 февраля 2013 года около 9:20 утра по местному времени (Челябинск).

Координаты места падения: 54.955146° N 60.326614° E, оз. Чебаркуль в Челябинской области.

По данным большинства исследователей метеорит Челябинск относится к редкому классу обыкновенных хондритов – LL5 (S4, W0). Хондриты этого класса составляют всего 2 % от общего числа зарегистрированных метеоритов по всей планете. Исследованные нами фрагменты метеорита представляют собой оплавленные удлинённо-округлые, угловато-округленные изометричные или неправильные по форме угловатые с закругленными углами обломки (рис. 1, *a–e*). Их размеры (по длинной оси) варьируют от 0,5 до 2,2 см, а вес – от 0,6 до 4,31 г. Все фрагменты полностью или частично покрыты черной или черной с коричневым оттенком стекловатой корой плавления толщиной от 0,1 до 0,8 мм, в среднем – около 0,5 мм. Хондры (иногда хорошо различимые даже на неровной поверхности сколов) размерами 0,2–1,8 мм составляют от 20 до 35 % площади некоторых сколов и имеют округлую изометричную, удлинённо-округлую или неправильную обломочную форму. На поверхности фрагментов, лишенных сплошной термогенной каймы, четко видны тонкие (мощность 0,1–0,2, иногда до 0,5 мм) темные, почти черные, извилистые прожилки, секущие образец. Цвет этих прожилков связан, скорее всего, с тонкораспылёнными непрозрачными фазами (сульфидами). В работах эти структуры описаны как прожилки ударного расплава (ударные прожилки), возникающие при соударениях астероидов друг с другом. Одному из авторов статьи, Б. Лобастову, довелось поучаствовать на конференции, посвящённой годовщине падения метеорита Челябинск «Метеорит Челябинск – год на Земле». В рамках этой конференции у него была возможность не только увидеть своими глазами самый крупный фрагмент метеорита, который представлен в Челябинском государственном краеведческом музее (рис. 2), но и поучаствовать в открытии памятного монумента на озере Чебаркуль (рис. 2). К сожалению, не обошлось без ляпов: на монументе были указаны неверные координаты, если верить им, то метеорит упал не в озеро Чебаркуль, а куда-то в Северное море недалеко от берегов Норвегии. На этой конференции в дар нашему институту Министерством по радиационной и экологической безопасности Челябинской области был передан фрагмент метеорита Челябинск массой 216,6 г, увидеть который можно в зале геологического сектора музея СФУ.



*Рис. 2. На фоне самого крупного фрагмента метеорита Челябинск в краеведческом музее (слева) и рядом с только что открытым на оз. Чебаркуль монументом, посвящённым годовщине падения метеорита*

### **Сихотэ-Алинский метеорит**

Метеорит упал в 10 часов 38 минут по местному времени 12 февраля 1947 года около посёлка Бейцухе Приморского края.

Координаты падения: 46 9,600 N 134 39,200 E.

Это железный метеорит массой 23 т, часть метеоритного дождя, общая масса осколков которого оценивается в 60–100 т. Входит в десятку крупнейших метеоритов мира. Представленный в нашей коллекции образец (рис. 1 и) длиной около 4 см имеет на поверхности неровные, крючковатые изломы, вытянутые и сильно искажённые. На поверхности он тёмно-серого цвета, но местами покрыт оранжевато-бурыми пятнами ржавчины.

Он раздробился в атмосфере и выпал железным дождём на площади 35 квадратных километров. Отдельные части дождя рассеялись по тайге на площади в виде эллипса с большой осью длиной около 10 км. В головной части эллипса рассеяния, площадью около квадратного километра, получившей название кратерного поля, было обнаружено 106 воронок диаметром от 1 до 28 м, причём глубина самой большой воронки достигала 6 м. По химическим анализам Сихотэ-Алинский метеорит состоит из 94 % железа, 5,5 % никеля, 0,38 % кобальта и небольших количеств углерода, хлора, фосфора и серы. По своей структуре он относится к весьма грубоструктурным октаэдритам.

### **Кампо-дель-Сьело (Campo del Cielo)**

Упал примерно 4600 лет назад, в 800 км к северо-западу от Буэнос-Айреса, найден в 1576 году.

Координаты места находки: 27°28 S 60°35 W.

Это железный метеорит весом 44 т. В нашей коллекции представлен небольшими фрагментами (не больше 2 см) тёмно-серого, почти чёрного цвета. Имеется большое количество крючковатых, вытянутых изломов (рис. 1 ж).

Обнаружили этот метеорит испанские колонизаторы в далёком 1576 году, однако он уже был известен коренным народам этой местности. Когда испанский

губернатор узнал о наличии железных камней у индейцев, им была послана экспедиция под командованием капитана де Миравала, который привез несколько огромных и тяжелых железных образцов. Наибольший из них получил название Мезон де-Фьерро (большой железный стол). Крупнейший кратер на месте падения метеорита составляет 115 м в диаметре и 2 м в глубину. Химический состав: 92,6 % железо, 6,68 % никеля, 0,43 % кобальт и 0,25 % фосфор, относится к типу Iron IA-Og.

### **Каньон Дьябло (Canyon Diablo)**

Упал около 20 000–40 000 лет назад, по данным некоторых исследователей – 50 000 лет назад, найден в 1891 году.

Координаты места находки: 35°3 N 111°2 W, Аризона.

Железный метеорит весом около 30 т. Был найден в 3–4 милях от каньона Дьябло, Аризона, США. Фрагменты метеорита хранятся во многих музеях мира. В нашей же коллекции этот метеорит представлен единственным фрагментом длиной в 2 см и массой в 4 г. Это уплощённый, покрытый слоем гидроксидов железа фрагмент с неровной, шероховатой поверхностью (рис. 1, з). В некоторых местах проглядывается стально-серое самородное железо.

С падением этого метеорита связано образование знаменитого кратера Бэррингера, земляной чаши диаметром 1200 метров и глубиной 180 метров. Метеорит относится к группе IAB-MG и считается грубоструктурным октаэдритом.

Интересно, что при исследовании изотопного состава свинца этого метеорита впервые было показано, что он имеет первичный изотопный состав. Это было принято во внимание при расчете абсолютного возраста Земли. В ряде исследований по фрагментам метеорита Каньон-Дьябло используют в качестве стандартного (например, при рентгеноспектральном микроанализе никелистого железа метеоритов, при масс-спектрометрическом изучении изотопного состава S, не только метеоритной, но и земной и т. п.).

В метеоритах хранится ключ к пониманию образования и строения нашей планеты, ведь они сформировались из того же вещества и в то же время, что и Земля. Если же на Земле и осталось первичное, неизменённое вещество, то эти глубины нам недоступны, самые глубокие скважины пробурены всего лишь на 12,2–12,7 км. Метеориты же значительно расширяют наши знания о строении Земли. В нашей коллекции представлены метеориты разных типов, найденные в разных частях земного шара. Хотелось бы в дальнейшем пополнить эту коллекцию метеоритами наиболее распространённых типов, а так же образцами известных метеоритов, например, Сеймчан. Как мы уже сказали, в метеоритах кроются ещё многие загадки, ответив на которые мы сможем лучше понять, как и из чего образовалась наша планета и Солнечная система. Надеемся, что своей статьёй мы смогли заинтересовать этим вопросом ещё кого-нибудь.

## ОБЗОР КРИОМИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПЕЩЕР

**С.А. Сильянов**

**Научный руководитель проф., канд. геол.-минерал. наук Е.А. Звягина**

*Сибирский федеральный университет*

*Институт горного дела, геологии и геотехнологий*

Процесс охлаждения и замерзания раствора неминуемо ведет к повышению концентрации растворенных в нем компонентов и последующей их кристаллизации. Такой процесс, протекающий при отрицательных температурах, носит название криогенного минералообразования. Ареной деятельности криоминарагенеза, с географической точки зрения, являются те районы, где постоянно или периодически наблюдаются отрицательные температуры. К таким местам, прежде всего, относятся полярные регионы, а также районы с умеренным климатом.

В плане вертикального разреза земной коры такие процессы развиты в частях с температурой пород, близкой к 0 °С. Таким образом, процессы криоминарагенеза затрагивают все регионы с многолетней мерзлотой.

В общем случае криоминарагенез можно рассматривать как частный случай и (или) следствие криохимических процессов. А именно, процессов фазовых превращений воды и растворенных в ней минеральных компонентов, происходящих при отрицательных температурах. Нарушение химического равновесия раствора может происходить как при замерзании воды, так и при таянии льда.

Проявления криоминарагенеза весьма многочисленны. Однако в настоящее время не существует какой-либо классификации их обстановок и типов. Наиболее крупными обстановками являются районы современного оледенения, здесь криохимические процессы связаны с наземными ледниками, а также с подземными льдами. К последним относятся районы с многолетней мерзлотой, и, в том числе, районы более южные, где подземный лед накапливается в подземных пустотах – пещерах. Отдельную своеобразную обстановку криоминарагенеза характеризуют наледи, образующиеся в холодных районах в зимнее время в местах выхода на поверхность подземных вод. Наледи встречаются как в районах оледенения, так и в районах распространения многолетнемерзлых пород. Зимнее вымораживание речных и озерных вод в холодном и умеренном климатических поясах также сопровождается криохимическими процессами. Особую обстановку образуют высокогорья с нивальным поясом, где имеются и ледниковые образования, и многолетнемерзлые породы, и наледи, и пещеры. Кроме того, на склонах горных массивов, даже ниже нивального пояса, имеет место криоминарагенез в плаще скальных выветрелых образований. Среди упомянутых обстановок высших уровней можно выделить множество низестепенных условий и ситуаций, где проявляются криохимические процессы, сопровождающиеся минералообразованием.



Спелеокриоминерагенез наиболее интересен в плане минералогического и морфологического разнообразия криоминералов. Как отмечалось выше, подземные полости и пещеры образуют специфическую среду холодного минералообразования. Отличительной ее особенностью является повышенная минерализация замерзающих вод. Криоминеральные образования пещер – это, в основном, мучнистые образования на ледяных телах, так называемая гипсовая мука, порошкоподобные скопления в нишах вытаивания, покровы на поверхностях ледяных тел, выцветы и остаточные скопления на месте растаявших ледяных образований.

Все криоминеральные образования пещер можно условно разделить на два типа: образования пещер с многолетними льдами и образования пещер с сезонным оледенением, так называемые эфемерные образования.

Несомненно, литологический состав вмещающих пород оказывает большое влияние на минеральный состав криообразований. Так, в гипсовых пещерах резко преобладает гипс, реже встречаются целестин и кальцит, в известняковых пещерах доминируют карбонаты кальция. Естественно, значительную долю имеют и акцессорные образования, как привнесенные извне, так и внутрипещерные.

Исследования В.Н. Андрейчука показывают, что основным механизмом спелеокриоминерагенеза является нарушение химического равновесия компонентов в растворе вследствие образования ледяного натека и замерзания водного раствора. Процесс замерзания, повышающий концентрацию, имеет место в тонких (менее 1 мм) пленках, покрывающих ледяные образования. Кристаллизация происходит этапно: сначала происходит частичная кристаллизация льда, которая повышает концентрацию веществ в растворе, а затем, по мере насыщения раствора, дальнейшей кристаллизации льда сопутствует этапно-сингенетическое выпадение из раствора минералов: в случае сульфатно-кальциевых растворов (гипсовые пещеры) – гипса, а затем кальцита и целестина, а в случае гидрокарбонатно-кальциевых вод – разных фаз карбоната кальция. При данном механизме происходит последовательное «вмораживание» и «захоронение» в ледяной массе минерального компонента растворов в кристаллическом виде. Если подземная наледь увеличивает свои размеры, то в ней последовательно, слой за слоем, происходит накопление криовещества.

Изучение криоминеральных образований пещер имеет важное научное значение: минеральные новообразования генетически связаны со слабоизученными криохимическими процессами; самостоятельный седиментологический интерес представляет изучение своеобразных пещерных отложений; выявление криогенетических признаков минеральных образований позволит проводить палеогляциологические реконструкции.

Как показывают исследования, образования пещер с многолетним обледенением имеют отличительные морфологические особенности. Так, в гипсовых пещерах преобладают таблитчатые кристаллы, а также наблюдается большое количество сферолитовых образований, сростков с углублениями, часто геометрически правильной формы. В случае криохимического генезиса углубления наиболее правдоподобно объясняются моделью кристаллизации – углубления есть реликтовое пространство от растаявших ледяных кристаллов. Криоматериал известняко-

вых пещер представлен уплощенными образованиями с ровной поверхностью основания и развитым на ней слоем расщепленных кристаллов. На крупных кристаллах (20–30 мкм) наблюдаются грани минимум двух простых форм, представленных ромбоэдрами, на которых отмечаются скелетные и трансляционные формы, связанные с чередованием процессов роста-растворения. В целом, криоминералы имеют небольшие размеры, расщепленные формы и ячеистую структуру льда.

Для пещер с сезонным оледенением характерны эфемерные образования, которые представляют собой волокнистые агрегаты, растущие субперпендикулярно поверхности субстрата. Подобные образования часто называют «гипсовый мох» или «гипсовый пух», действительно, минералогически эти агрегаты являются гипсом, а морфологически – массой тонкоигольчатых и волокнистых кристаллов, длиной 1,5–2 см. Генетически подобные агрегаты могли образоваться за счет капиллярного питания минерализованными растворами через породный субстрат. В летний период такие образования исчезают.

Вопросы криоминарагенеза изучены слабо, касаются, в основном, строения и роста ледяных кристаллов и химического состава растопленных льдов. Минеральные образования пещерных льдов, их возникновение и морфология практически не изучены. На сегодняшний день самой изученной в этом плане является Кунгурская ледяная пещера, также исследованы пещеры Иркутской и Читинской областей и пещеры Приуралья.

В Красноярском крае насчитывается более 150 крупных пещер, многие из которых имеют многолетние льды. Пещеры с многолетним оледенением представляют большой интерес в плане исследования их на предмет криоминеральных образований.

## **ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

УДК 553.08

### **ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ И ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА РОССЫПНОГО ЗОЛОТА БАСЕЙНА РЕКИ ГОЛЫШЕВА (О. БОЛЬШЕВИК, АРХ. СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ)**

**Г.В. Белоконов**

**Научный руководитель д-р геол.-минерал. наук В.А. Макаров**

*Сибирский федеральный университет*

Остров Большевик располагается в зоне арктической пустыни, характеризующейся развитием сплошной многолетней мерзлоты и современного оледенения покровного типа. Климат района типично арктический – с низкой среднегодовой температурой (–14–18 °С) и сравнительно небольшим количеством (150–200 мм) осадков. При продолжительности полярного дня 140 суток сезон с положительной среднесуточной температурой воздуха не превышает 2,5 месяцев.



Разведанные россыпи золота бассейна реки Голышева локализуются в среднем – верхнем течении главной реки и по двум её основным притокам, где в совокупности протягиваются почти на 30 км. Сам бассейн реки Голышева находится в юго-восточной части острова Большевик, второго по величине и самого южного в архипелаге Северная Земля. В бассейн входят россыпи р. Голышева, р. Ковалева и р. Логинова.

Россыпные проявления золота отмечаются в основном только на юге острова, где связаны, в первую очередь, с аллювиальными комплексами наиболее крупных рек, в древних долинах которых продуктивность локализуется на отрезках, развитых в пределах возвышенной денудационной равнины.

Самородное золото в россыпях наследует состав питающих её рудных источников. Для россыпного золота данных россыпей характерно большее влияние механических процессов выветривания, преобладающих над химическими.

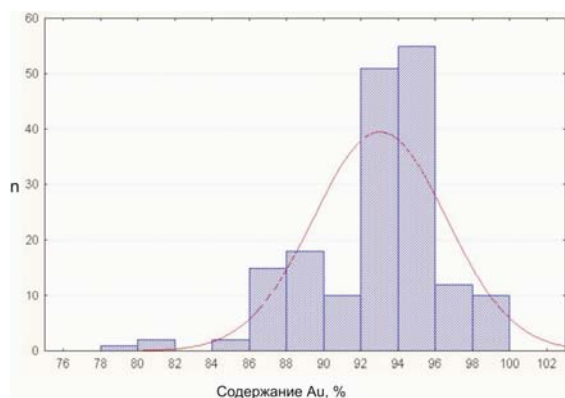
Качество полезного компонента во всех россыпях бассейна достаточно однородно и его типоморфные характеристики весьма близки между собой.

Форма выделения золота – преимущественно пластинки и таблички, также встречаются чешуйки и округлые формы. Окатанность большей части металла слабая, на поверхности зерен наблюдается шероховатость. По морфологии преобладают золотины неправильного типа, изометричные и разветвленные разновидности находятся в подчиненном значении. Деформации золотин выражаются в загибах краёв, перегибах и смятии пластинок пополам. Кроме того, на поверхности некоторых зёрен отмечается различная штриховка и наблюдаются характерные зеркала скольжения. Ряд золотин имеет проволоковидную форму выделения. Повсеместно встречаются вростки кварца и примазки вмещающих пород, значительно реже попадают вростки сульфидов. Также на различных участках россыпей наблюдаются плёнки гидроокислов, которые обычно развиты в углублениях золотин, иногда встречаются в виде рубашки.

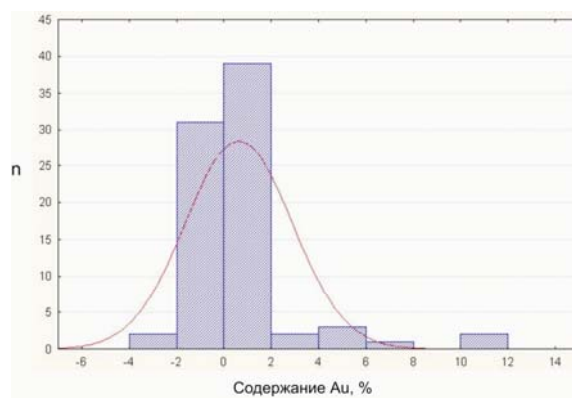
Преобладающий цвет металла – жёлтый (85–99 %) и светло-жёлтый, иногда с зеленоватым оттенком, реже встречаются красноватые выделения.

Отобранные золотины анализировались в полированных шашках (монтированный аншлиф) микрорентгеноспектральным анализом на микрозонде MS-46 «Самеса». Данный анализ позволил выявить количественные соотношения между содержанием золота и элементов-примесей. Среди элементов-примесей определялись медь, ртуть и серебро. Средняя пробность золота – 950 ‰, с небольшими отклонениями для светло-желтых, красноватых и зеленоватых разновидностей. Также отмечается ряд золотин, имеющих пробность 800–820 ‰. Условно можно выделить золотины с пробностью 860–900 ‰ (рис. 1). Стоит отметить, что на части исследуемых золотин наблюдается высокопробная оторочка, содержание золота в которой достигает 97,5–99,5 %. В целом, разность содержаний золота в центральной и краевой части золотин варьируется от 0–20 до 60–80 ‰, достигая в отдельных золотилах 100–120 ‰ (рис. 2).

Серебро присутствует в большем числе золотин в количестве 40–60 ‰, доходя до 160 ‰. В высокопробной кайме содержание серебра, как и других примесей, снижается.



*Рис. 1. Гистограмма содержаний Au в исследуемых золотинах*



*Рис. 2. Вариации содержаний Au в системе кайма-центр*

Сравнительный анализ россыпного золота и золота, полученного из кварцевых жил, подтверждает рабочую гипотезу о том, что коренными источниками исследуемых россыпей являются кварцевые жилы, относящиеся к золото-кварцевой и малосульфидной золото-кварцевой формации. Кроме того, возможно предполагать, что коренных источников было несколько (о чём свидетельствуют и формы кристаллов золота, отражающие различные условия формирования металла – от глубинных до близповерхностных). Присутствие в россыпях неокатанного золота, вероятно, указывает на сохранность золоторудной минерализации на уровне современного эрозионного среза. Также на это указывают находки самородного золота в приповерхностных условиях. Каких-либо пространственных закономерностей изменчивости золота на протяжении россыпи не наблюдается.

УДК 553.3.072

## **ГЕОЛОГИЯ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД УЧАСТКА «ЗАДОРНЫЙ» (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧУКОТКА)**

**П.А. Казоба, А.С. Филиппов**

**Научный руководитель проф., канд. геол.-минерал. наук В.Г. Михеев**

*Сибирский федеральный университет*

Участок Задорный в административном плане расположен на территории Билибинского района Чукотского автономного округа в районе впадения в нее р. Теленеут и руч. Крупный (Задорный), выявлен в 2008 году при литогеохимической съемке по вторичным ореолам рассеяния, проводимой под руководством О.А. Фурман.

Особенностью геологического строения Центрально-Бургахчанской площади является положение ее в области сочленения Ненканской на западе и Вукваамской на востоке структурно-формационных зон, разделенных Анюйско-Алучинским тектоническим швом. Стратифицированные образования на участках работ, запланированных на 2013 год, представлены вулканогенно-терригенными толщами поздней юры-раннего мела, развитыми к западу от Анюйско-Алучинского шва, раннемеловыми покровными образованиями от основного до кислого состава, базальтовыми потоками позднечетвертичного возраста и водно-ледниковыми отложениями неоплейстоцена. Интрузивные образования представлены разновозрастными комплексами разнообразного состава – от позднепалеозойских гипербазитов алучинского и первомайского комплексов до раннемеловых дериватов среднего, кислого и щелочного состава егдэгкычского комплекса.

В пределах Бургахчанской площади известны различные виды минерального сырья. Наиболее перспективными в настоящее время являются золото, серебро, медь. Кроме того, в разрезе проявлений установлены молибден, вольфрам, мышьяк, сурьма. В ранге пунктов минерализации выявлены титан, хром, никель, в небольших количествах – отдельные редкие и рассеянные элементы: галлий, иттрий, из благородных металлов – платиноиды. В пределах территории известны месторождения золота, серебра, меди. Ранее установлены новые проявления и пункты минерализации черных, цветных, редких и благородных металлов, редкоземельных элементов, шлиховые ореолы золота, киновари, вольфрамита и шеелита, геофимические аномалии – потоки и ореолы рассеяния многих металлов.

Участок «Задорный» по геологическому строению условно можно разделить на две части:

Южный фланг участка (примерно  $\frac{1}{3}$  по площади), расположенный в междуречье р. Теленеут – руч. Задорный, сложен преимущественно вулканитами основного состава тальниковской толщи нижнего мела ( $K_{1tl}$ ). Вулканогенные толщи прорываются телами габброидов первой фазы и монцонитоидов, сиенитоидов, субщелочных гранитоидов завершающей фазы становления егдэгкычского габбро-монцонит-сиенитового комплекса ( $v\delta_1^1 K_{1e} - \gamma_2^2 K_{1e}$ ), а также дайками аналогичного состава.

Северная часть участка почти полностью находится в границах интрузивного многофазного массива егдэгкычского комплекса раннемелового возраста, сложенного разновидностями пород от габброидов ранней фазы, через монцониты и щелочные породы среднего состава до кварцевых сиенитов и гранитов поздней фазы.

Среди интрузивных пород егдэгкычского комплекса встречаются, в виде небольших останцов, породы позднеюрского возраста – андези-базальты и их туффиты зыбкинской свиты ( $J_3zb$ ) и алевропелиты и туфы среднего состава глуховской свиты ( $J_3gl$ ).

Четвертичные отложения, распространенные в долинах всех водотоков, представлены водно-ледниковыми отложениями ойягосской стадии позднечетвертичного оледенения и современными аллювиальными отложениями.

Таким образом, интрузивные образования егдэгкычского габбро-монцонит-сиенитового комплекса составляют свыше 50 % территории участка. Со

становлением данного комплекса связывается формирование комплексного оруденения на участке.

В пределах южной части участка установлено 8 линейных зон метасоматически измененных пород, как во вмещающих породах, так и внутри интрузивных тел. Ориентировка зон преимущественно северо-восточная, реже субширотная, длина от 150 до 800 м. В верховьях и на правобережье руч. Рыбный, кроме того, выявлены кварцевые метасоматиты неустановленной ориентировки, сопряженные с разломами СЗ и В-СВ простирания. В бассейне руч. Чудный вмещающие и интрузивные породы вдоль крупного тектонического нарушения северо-восточного простирания, по которому заложена долина р. Теленеут (Теленеутский разлом), интенсивно эпидотизированы.

При литогеохимической съемке в 2013 году нами были отобраны образцы с двух канав, которые пересекали аномальные ореолы. В результате была составлена коллекция, которая в дальнейшем была микроскопически изучена, и выявлен примерный состав руд.

В составе руд преобладает кварц, плагиоклаз, роговая обманка, биотит. Менее распространен кальцит. Рудные минералы, их доля в рудах около 5 %, представлены пиритом, халькопиритом, магнетитом, рутилом, пирротинном.

#### **Минеральные ассоциации:**

1. *Кварц-пирит-халькопиритовая ассоциация* – ранняя метасоматическая формация. Представлена кварцевыми прожилками с включениями пирита и халькопирита. Масштабы проявления порядка 10 метров. Основными минералами являются кварц, пирит, халькопирит и плагиоклаз.

2. *Магнетит-рутиловая ассоциация*. Более поздняя минеральная ассоциация. Представлена в виде вкраплений. Данные рудные минералы образуют идиоморфнозернистые и аллотриоморфнозернистые микроструктуры.

3. *Гидротермальная ассоциация (кварцево-пирит-прожилковая)*. Имеет распространение в некоторых частях породы. Основным минералом является кварц, пирит, халькопирит, который представлен прожилками. Образует гранобластовую микроструктуру.

Предполагается, что было несколько стадий минералообразования, так как имеются минимум две генерации пирита. Пирит первой генерации подвергся коррозии (обрастанию магнетитом и рутилом), а затем уже рутил и магнетит подвергаются коррозии и обрастанию пиритом 2-й генерации. Исходя из этого можно утверждать, что было три режима: 1 – серный, с образованием раннего пирита, халькопирита, 2 – кислородный, с образованием магнетита, 3 – серный, с образованием позднего пирита.

По имеющимся данным генезис участка «Задорный» схож как с месторождением «Купол» золотосеребряного типа, так и с медно-поффрировым месторождением «Песчанка», но из-за малого количества данных вопрос генезиса остается открытым.

Для площади прогнозируемого рудного поля «Задорный» характерны высоконтрастные аномалии золота, серебра, молибдена, меди, свинца и цинка. Орео-

лы с максимальным содержанием золота (2 г/т), серебра (15 г/т), свинца (0,15 %), меди (0,1 %) концентрируются преимущественно в зоне экзоконтакта интрузива, среди покровных фаций тальниковского андезибазальтового комплекса берриаса.

Прогнозные ресурсы категории РЗ аномалии «Задорный» в потоках рассеяния оценены в количестве Au 19,5 т, Ag 300 т. Ресурсы аномалии во вторичных ореолах в ранге прогнозируемого рудного поля «Задорный» (23 км<sup>2</sup>) рассчитаны на глубину 100 м при коэффициенте пропорциональности 0,1 и коэффициенте учета забалансовых руд = 0,1: Au 20 т, Ag 193 т, Cu 31,1 тыс. т, Mo 0,9 тыс. т, Zn 100,7 тыс. т, Pb 41,7 т.

Золотосеребряное отношение Au:Ag=1:10 и характер метасоматически измененных пород – потенциальных рудных тел позволяет ожидать выявление рудных аномалообразующих объектов золото-серебряной рудной формации, возможно с наложением серебро-полиметаллической формации. Размер прогнозных ресурсов вторичных ореолов аномалии «Задорный» характеризует потенциально мелкий – средний по масштабам комплексный золото-серебряный объект с попутной медно-молибденовой и полиметаллической компонентами. Объект перспективен и по размерам ресурсов может рассматриваться как первоочередной.

УДК 550.4.02

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАРТИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ СОВЕТСКО-ПЕРЕВАЛЬНИНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)**

**В.А. Соколов, В.И. Наидко**

**Научный руководитель д-р геол.-минерал. наук В.А. Макаров**

*Сибирский федеральный университет*

Поиски коренного золота на территории Енисейского кряжа в настоящее время очень актуальны, так как минерально-сырьевая база истощается, а прирост запасов и ресурсов золота незначителен. Для решения имеющихся здесь проблем предполагается ряд способов прогнозирования и поисков коренных золоторудных месторождений в пределах кряжа, базирующихся на различных принципах. Нижеизложенный способ может являться одним из признаков при постановке прогнозно-поисковых работ.

В данной работе кратко приводится способ маркировки горных пород на основании площадных геохимических данных, полученных в результате поисковых работ (литогеохимическая съемка по вторичным ореолам рассеяния с густотой сети 500×100), проведенных компанией ЦГИ «Прогноз» на всей территории Советско-Перевальнинского рудного узла, в 2012 г. Количественная характери-

стика по всем химическим элементам была получена с помощью рентгенфлуоресцентного анализа (РФА).

Цель данной работы – оперируя геохимическими данными, уточнить геологическое строение и выделить характерные геохимические параметры (химические элементы), свойственные определенным толщам горных пород или магматическим комплексам.

Для достижения поставленной цели был выполнен ряд задач:

- составлены геохимические карты ряда петрогенных элементов (Fe, Ca, Ti, K) и редких, литофильных, химических элементов, таких как Zr, Rb и Sr;
- интерпретация и выявление определенных признаков распространения, выделенных химических элементов, и их «маркирующая способность» для конкретных толщ горных пород или магматических комплексов.

В геологическом строении района Советско-Перевалинского рудного узла принимают участие породы нижнего протерозоя, рифея, четвертичной системы. Метаморфизованные породы раннего протерозоя и рифея смяты в сложные складки, прорваны телами гранитов Татарско-Аяхтинского комплекса и дайками габброидов орловского комплекса. Горные породы рифея осложнены многочисленными разрывными нарушениями и зонами расланцевания. Кроме процессов регионального метаморфизма амфиболитовой и зеленосланцевой фаций в породах нижнего протерозоя и рифея проявлены наложенные динамотермальные и метасоматические преобразования. Диагенетически измененные осадочные породы позднего рифея смяты в простые линейные и коробчатые складки, кайнозойские отложения залегают горизонтально.

На территории Советско-Перевалинского рудного узла выделяется три генетических типа золоторудных месторождений: кварцево-жильный тип, к нему относятся два крупных месторождения – Советское и Эльдorado, ряд мелких месторождений (Пролетарское и др.) и рудопроявлений (Успенское); тип жильных зон и штокверков, к нему относятся: Буян, Александрo-Агеевское; кварцевых жил и минерализованных зон, в данный тип включаются такие мелкие месторождения, как Доброе, Первенец и др.

Для выполнения поставленных задач применялось программное обеспечение ArcGIS 9 (ArcMap version 9.3) и Microsoft Excel. С помощью этих программ были обработаны данные литогеохимической съемки и построены геохимические карты масштаба 1:100 000 с помощью функций геостатистики, методом кригинга.

Составленные карты были проанализированы и выделены следующие гипотезы распределения исследуемых химических элементов:

1. Наиболее четко картируются выходы Орловского базальт-андезит-риолитового комплекса, такими элементами, как Fe, Ti, Ca, K, Rb. Часть элементов (Fe, Ti, Ca) имеют повышенную интенсивность по сравнению с фоном, так как эти элементы преобладают в основных магматических породах, в то время как часть геохимических элементов (K, Rb) обладает пониженной интенсивностью.

2. Анализируя карты геохимических полей рубидия и калия, можно высказать предположение, что отдельные участки метаморфизованных толщ сухопит-

ской серии (удерейская и горбилотская свиты) подверглись процессам щелочного (калиевого) метасоматоза. Данная гипотеза основывается на том, что именно в данных свитах обнаруживаются интенсивные аномалии Rb и K, а также именно в этих аномалиях располагаются тела березитов и участки березитизации.

Так как золотое оруденение часто приурочено к телам березитов и площадям березитизации, можно по аномалиям Rb и K предположить возможное расположение участков березитизации, следовательно, использовать как косвенный признак при прогнозировании и поисках коренных золоторудных месторождений.

3. Стронций на площади хорошо коррелирует с кальцием, его удобно использовать для маркирования горных пород, содержащих карбонатные прослои.

Изучая его распределение на территории Советско-Перевальнинского рудного узла, можно по точечным и интенсивным аномалиям (всплескам содержания) Sr маркировать удерейскую свиту. Основанием для этого является то, что в удерейской свите прослеживаются прослои карбонатсодержащих пород, которые и являются источником «ураганных» всплесков содержания стронция.

4. Возможно выделение терригенных пород суворовской и чивидинской свит по аномалиям циркония. Данные предположения основываются на уже известных закономерностях, полученных при изучении распределения Zr на смежной с Советско-Перевальнинским рудным узлом структуре – Дюбошском грабене. В пределах грабена аномалии циркония хорошо маркируют терригенные породы, представленные песчаниками, гравелитами, аргиллитами и т. д.

Практическое применение данных площадного геохимического картирования заключается в том, что маркирование удерейской свиты позволит более продуктивно вести прогнозно-поисковые работы, так как данная толща вмещает большое количество золоторудных объектов.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

- правильно построенные и качественно интерпретированные геохимические карты могут использоваться для маркирования отдельных толщ горных пород, имеющих определенные геологические особенности;
- помимо горных пород, опираясь на геохимические данные, можно маркировать участки с наложенными вторичными процессами (березитизация, карбонатизация и др.), как это было показано на примере Rb и K;
- вышеописанный способ интерпретации геохимических данных имеет практический характер и может являться косвенным признаком при прогнозировании и поисках месторождений полезных ископаемых, а также при геологическом картировании.

# ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ

УДК 553.064.32

## ИЗВЕСТКОВЫЕ СКАРНЫ АЛЕКСЕЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНАЯ ХАКАСИЯ)

**С.С. Налобина**

**Научные руководители доц. О.Ю. Перфилова, проф. А.М. Сазонов**

*Сибирский федеральный университет*

Алексеевское медно-молибден-вольфрамовое месторождение расположено в Ширинском районе северной Хакасии к северо-востоку от озера Домежак. Поисково-разведочные работы проводились в 1931–1934 гг. и в 1940–1953 гг. Сейчас это месторождение считается утратившим промышленное значение [1]. Медная, вольфрамовая и молибденовая минерализация (халькопирит, шеелит и молибденит) пространственно приурочена к телам известковых гранатовых и везувиан-гранатовых скарнов, возникших на контакте монцонитов среднекембрийского когтахского сиенит-габбрового комплекса и известняков тюримской свиты венда [1, 3].

Скарны возникли в зоне высокотемпературного контактового ореола интрузий в результате реакционного взаимодействия карбонатных пород с магмой, интрузивными и другими алюмосиликатными породами при посредстве магматогенных растворов. Основным морфологическим и генетическим критерием, отличающим контактовые месторождения от месторождений других генетических групп, следует считать развитие в их полях и рудах скарновых минералов. Скарны развиваются с магмами разного состава, но наиболее характерными для их развития являются интрузии кислого и среднего состава, прорывающие известняки. Скарны образуют серию линзовидных тел, вытянутых в субмеридиональном направлении.

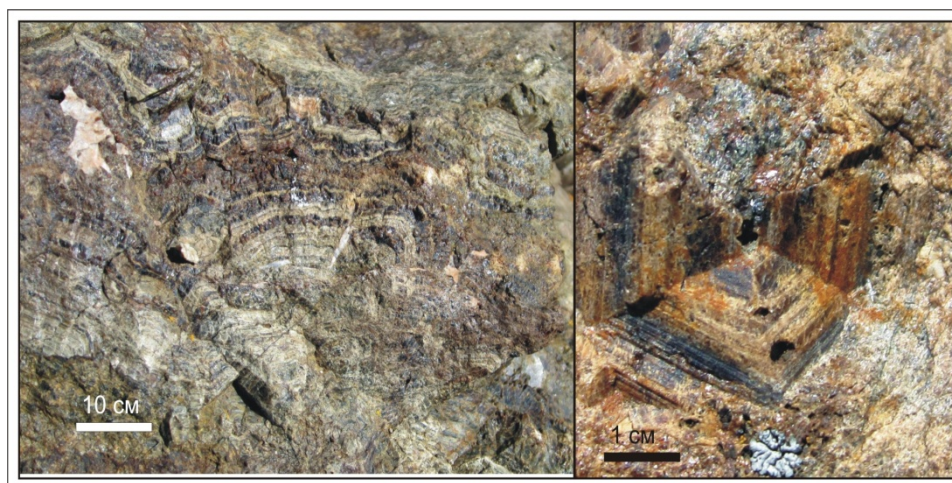
Монцониты второй фазы когтахского комплекса, скарны и мраморизованные известняки тюримской свиты прорваны серией субпараллельных даек северо-восточной ориентировки, сложенных мелкозернистыми лейкократовыми кварцевыми сиенитами и граносиенитами юлинского комплекса позднего ордовика. Мощность даек – от 0,2 до 2,5 м. Как правило, дайки хорошо выражены в рельефе протяженными гривами высотой до 2 м. Нередко в граносиенитах наблюдаются мелкие ксенолиты пород ранних фаз когтахского комплекса и гранатовых скарнов. Иногда в граносиенитах присутствует рассеянная мелкая вкрапленность халькопирита и молибденита. В экзоконтактах дайковых тел граносиенитов нередко отмечается калишпатизация и окварцевание вмещающих пород. Наблюдается также амфиболитизация, эпидотизация, хлоритизация, окварцевание и гема-



титизация скарнов, контролируемые зонами дробления и смятия [3]. Гидротермальное медное, вольфрамовое и молибденовое оруденение наложено на скарны. Выделено 4 стадии оруденения: скарново-магнетитовая, сульфидная, сульфидно-кварц-карбонатная, кварц-кальцитовая [1, 3].

Минералогический состав сульфидных руд среди скарнов: халькопирит, молибденит, шеелит, борнит, пирит, галенит, гематит, пирротин, кобальтин, арсенипирит, висмутин, серебро, золото. Нерудные жильные минералы – кварц, кальцит, альбит, серицит [2].

Нередко наблюдается отчетливая зональность контактово-метасоматических пород: в зоне непосредственного экзоконтакта интрузии когтахского комплекса (мощностью 0,5–3,5 м) развиты практически мономинеральные тонкозернистые, мелкозернистые или среднезернистые гранатовые скарны массивной текстуры [4]. На большем удалении от контакта в зоне шириной 0,7–3 м – распространены гранатовые и везувиан-гранатовые скарны с крупными (до 7 см) порфиробластами отчетливо зональных гранатов и фестончато-полосчатые скарны (рис. 1), нередко содержащие различной величины и формы пустоты, в которых наблюдаются щетки хорошо образованных кристаллов гранатов ромбододекаэдрического габитуса без индукционной штриховки на свободных гранях [2].



*Рис. Фестончато-полосчатые скарны Алексеевского месторождения с крупными порфиробластами зональных гранатов*

При микроскопическом изучении установлено, что скарны обладают гранобластовой и гомеобластовой микроструктурой, иногда катаклазированы. Минеральный состав весьма разнообразен: главные минералы – гранат, диопсид, волластонит, эпидот, второстепенные – кварц и кальцит, редко – шеелит, вторичные – оксиды и гидроксиды железа (гематит, гетит), хлорит, кальцит. Рудный минерал представлен преимущественно магнетитом. Иногда на скарны наложена гидротермальная сульфидная минерализация (пирит, халькопирит, молибденит). Скарны сложены крупными, зональными зернами гранатов 60–90 %, клинопироксеном (15–25 %), волластонитом (10–20 %).

Гранаты наблюдаются в виде идиоморфных и субидиоморфных зерен размерами от 0,1 до 30 мм. В них чередуются зоны шириной от 0,01 до 4 мм коричневого и светло-бурого цвета. В проходящем свете минерал имеет слегка желтоватый оттенок, в скрещенных николях характеризуется сложным концентрически зональным и секториальным строением, подчеркиваемым светло- и темно-серыми цветами интерференции.

Нами в физико-химической лаборатории ЦКП СФУ (г. Красноярск) был выполнен рентгенфлюоресцентный анализ состава темно-коричневых визуально однородных гранатов (волновой рентгенофлуоресцентный спектрометр фирмы *Shimadzu XRF-1800*) и микрозондовый анализ зональных гранатов.

По данным рентгено-флюоресцентного анализа темно-коричневых гранатов из мономинеральных гранатовых скарнов зоны непосредственного экзоконтакта их состав (пересчет по кислородному методу):  $(\text{Ca}_{2,92}\text{Mn}_{0,08})_3(\text{Fe}_{1,35}\text{Al}_{0,65})_2[\text{SiO}_4]_3$ , что соответствует 67,5 % андрадитового минала, 29,8 %grossулярового минала и 2,7 % спессартинового минала. В результате микрозондового анализа отчетливо зональных гранатов выявлено, что темноокрашенные зоны обогащены железом (до 5,87 ат. %) и марганцем (до 0,39 ат. %) и практически аналогичны по составу ранее описанным незональным гранатам из скарнов экзоконтактной зоны, а более светлые по составу приближаются к grossуляру – содержания железа в них минимальны – 1,49–2,59 ат. % (до 67,5 % grossулярового минала), а марганец не обнаружен. В целом, отмечается прямая корреляция содержаний марганца и железа в гранате.

Эпидот наблюдается в виде идиоморфных призматических кристаллов размерами до 3 мм по длинной оси. Плеохроирует от светло-желтоватого до зеленовато-желтого. Характеризуется резко выраженной шагреневой поверхностью, высоким рельефом, обладает аномальным высоким двупреломлением («сарафанные» цвета интерференции).

Клинопироксен представлен преимущественно диопсидом. Наблюдается в виде короткопризматических идиоморфных кристаллов размерами от 0,2 до 2,5 мм, с восьмиугольными поперечными сечениями. Иногда образует мелкие пойкилитовые вроски в зернах граната. В проходящем свете практически бесцветен, двупреломление – высокое (максимальная интерференционная окраска синяя 3-го порядка).  $C:N_g = 38\text{--}40^\circ$ . Вторичные изменения проявлены достаточно интенсивно. Минерал замещается зернами карбоната, гидроокислами железа, редко – чешуйками хлорита и неправильными зернами кварца. В поперечном срезе некоторых зерен хорошо видно, что центральные части зерен сложены гранатом.

Волластонит представлен бесцветными призматическими кристаллами размерами от 0,2 до 0,9 мм. В скарнах с высоким содержанием волластонита минерал наблюдается в составе равномернозернистого агрегата с примесью пироксена и граната (гомеобластовая микроструктура). Спайность проявлена в одном направлении и наблюдается в виде тонких прямолинейных трещин. Интерференционная окраска низкая – серая, серовато-белая, серовато-желтая.

В большинстве изученных шлифов наблюдались немногочисленные ксеноморфные зерна кварца, который преимущественно залечивает трещины или вы-

полняет промежутки между зернами граната. Для кварца характерен низкий рельеф, отсутствие спайности и продуктов замещения.

Рудные минералы (магнетит, халькопирит, гематит, молибденит) представлены ксеноморфными выделениями и удлиненными в сечении зернами размерами от 0,3 до 3 мм по удлинению.

Таким образом, результаты наших наблюдений свидетельствуют о том, что в процессе образования скарнов Алексеевского месторождения неоднократно происходила смена условий минералообразования, что отразилось на составе различных зон породообразующих минералов и, прежде всего, граната.

### **Список литературы**

1. Геология и полезные ископаемые северной Хакасии. Томск: изд-во ТГУ, 1998. 173 с.
2. Жабин А. Г. «Онтогения минералов». М.: Наука, 1979. 275 с.
3. Липишанов А. П., Перфилова О. Ю. и др. Геологическое доизучение масштаба 1:50 000 и общие поиски на Туимской площади в восточной части Кузнецкого Алатау в 1989–93 гг. Красноярск, 1993.
4. Налобина С. С., Перфилова О. Ю. Зональность гранатов в известковых скарнах Алексеевского месторождения (Северная Хакасия) // Уральская минералогическая школа 2013, посвящённая минералогии, петрографии и геохимии метасоматических процессов: сб. ст. студентов, аспирантов, научных сотрудников академических институтов и преподавателей вузов геологического профиля. Екатеринбург: Изд-во ИГГ Уро РАН, 2013. С. 105–109.

УДК 549.621.9

## **ХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ГРАНАТОВ – ПОКАЗАТЕЛЬ УСЛОВИЙ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ**

**С.А. Сильянов**

**Научный руководитель проф., канд. геол.-минерал. наук Е.А. Звягина**

*Сибирский федеральный университет*

Наиболее полное представление об обстановке минералообразования несет химический состав минерала и неоднородность распространения того или иного компонента в нем. Как известно, отложение вещества на геохимическом барьере происходит с определенной скоростью, соответственно, стадии минералообразования отражаются в составе индивида. Вследствие этого может формироваться химическая зональность, мозаичность или иная неоднородность минерала. Д.П. Григорьев по этому поводу заметил, что макростроение минералов замечалось по физическим особенностям – по окраске, другим кристаллооптическим

свойствам, по распределению включений, при том, что строительные части были непременно различны и по химическому составу. По его словам, химическая зональность минералов общеизвестна и достигает иногда такой амплитуды, что в одном индивиде оказывается представленной разными зонами чуть ли не полная серия твердых растворов [2]. В свете этого видится необходимость детального изучения химического состава индивидов в группах минералов, отличающихся многокомпонентным и переменным составом.

Гранаты относятся к тем немногочисленным метаморфическим минералам, по составу или изменению состава которых можно судить об условиях метаморфизма. Альмандин является главным компонентом метаморфических гранатов. Богатые гроссуляром гранаты характерны только для карбонатных пород и метасоматических образований, связанных с процессами метаморфизма. Пироповый минерал является хорошим индикатором вариаций температур и давлений. Для низко- и среднетемпературных условий метаморфизма характерны весьма низкие содержания MgO, не превышающие, как правило, 3–4 %. Увеличение пиропового компонента отражает повышение температуры и (или) давления. Содержание пироба в метаморфических гранатах редко достигает 40–50 % и только в условиях очень высоких температур и (или) давлений при метаморфизме. Богатые спессартином гранаты (до 15–25 % MnO) наиболее характерны для низкотемпературных фаций метаморфизма.

Зональность гранатов является важным признаком, позволяющим оценить изменение термодинамических условий метаморфизма. Для оценки термодинамических факторов метаморфизма рудного поля было выполнено 144 анализа краевых и 161 анализ центральных зон граната. Микрорентгеноспектральный анализ выполнен на микрозонде *Camebax Micro* в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск). Пересчет химического состава образцов на кристаллохимические формулы произведен катионным методом. На основании полученных формульных коэффициентов рассчитан минеральный состав образцов гранатов.

Анализ классификационной диаграммы состава гранатов показывает, что центры большинства исследованных образцов имеют преимущественно спессартин-альмандиновый состав, в то время как краевые зоны образцов тяготеют к альмандиновому составу. Гроссуляр-альмандиновый и гроссуляр-спессартин-альмандиновый состав в равной степени присущ как краевым, так и центральным зонам. Как видно, образцы имеют в своем составе главным образом спессартин и альмандин, к тому же от центра к краю содержание альмандина увеличивается. Вероятно, в процессе роста зерен степень метаморфизма возрастала [3].

Размещение образцов на диаграмме Д.А. Великославинского (1972) плотное, подавляющее большинство точек расположено ниже границы зоны ставролита и субпараллельно ей, т. е. развитие и рост зерен происходили в зоне граната кианитового типа (рис. 1). Разделение центральных и краевых зон показывает, что формирование всех зерен происходило в зоне граната кианитового типа. Однако некоторое количество зерен могло заканчивать свой рост уже в зоне ставролита андалузитового типа. На диаграмме А.И. Сизых (1987) [6] образцы разместились в

зоне, отвечающей эпидот-амфиболитовой фации (рис. 2). Причем распределение образцов на диаграмме показательно также в плане разделения условий зарождения зерен и условий окончания их роста. Анализы краевых и центральных зон расположены субпараллельно относительно друг друга, краевые зоны ориентированы в сторону увеличения степени метаморфизма. Это свидетельствует о незначительном повышении температуры и давления на заключительных стадиях образования зерен.

В некоторых участках рудного поля в гранатах отмечается повышенное содержание CaO (до 23,6 % грандитового минала), свидетельствующее о метасоматическом изменении вмещающих пород [3], либо о повышении давления при метаморфизме. На прогрессивных стадиях метаморфизма осадочных толщ создается значительное увеличение доли флюида за счет непрерывной дегидратации. В частности, В.В. Хлестов показал, что при длительном прогрессивном метаморфизме могут развиваться значительные давления флюида, превышающие литостатические [4].

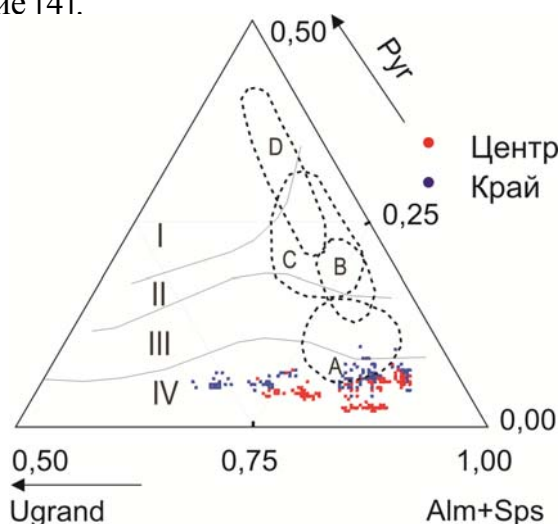


Рис. 1. Состав гранатов на диаграмме Д.А. Великославинского (1972). Поля составов граната метаморфизма кианитового типа: I – гранулитовая фация, II – зона силлиманита, III – зона ставролита, IV – зона граната; поля составов граната метаморфизма андалузитового типа: A – зона ставролита, B – зона первого силлиманита, C – зона второго силлиманита, D – зона гиперстена

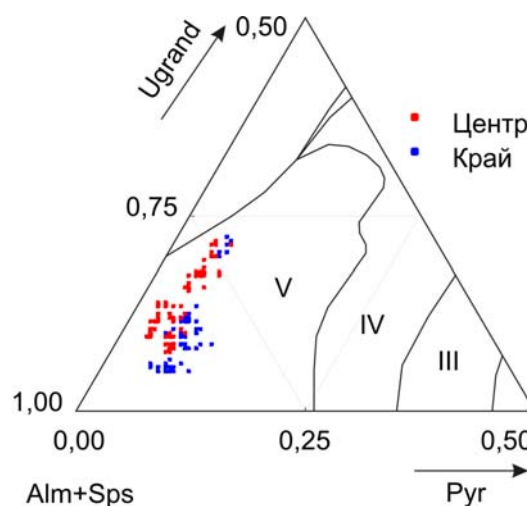


Рис. 2. Состав гранатов на диаграмме А.И. Сизых (1987). Поля составов граната: III – силлиманит – альмандин – ортоклазовой субфации, IV – дистен-альмандин-мусковитовой и ставролит-дистен-альмандиновой субфации амфиболитовой фации, V – эпидот-амфиболитовой фации

Изучение изменения среднего химического состава от центра к краям показывает, что, в целом, для образцов свойственна прямая изохимическая зональность. Зональность такого рода определяется возрастанием содержания FeO и MgO от центра кристалла к периферии, при одновременном падении MnO и росте магнезиальности. Действительно, по данным средних значений (центральные зоны: Alm – 62 %, Pyg – 4,5 %, Sps – 21,5 %, магнезиальность – 0,03; краевые зоны: Alm – 69 %, Pyg – 6,2 %, Sps – 11,2 %, магнезиальность – 0,05) обнаруживается прямой тип зональности. Зональность отнесена к изохимической на основании не-

сопряженного изменения содержания  $MnO$  и  $MgO$ . Прямая зональность отражает прогрессивность метаморфических реакций, в результате которых состав граната смещается в сторону разностей, бедных спессартином. Этот факт подтверждает приведенные выше гипотезы о повышении температуры и давления при росте зерен граната [1].

Все изученные микронзондовые профили зерен граната можно условно разделить на два типа: с прямой и сложной зональностью. Гранаты прямой зональности характеризуются типичным уменьшением содержания  $MnO$ , скомпенсированным увеличением  $FeO$  от центра к краям зерна. В этом типе выделяются два подтипа усложненной прямой зональности: с асимметрией основного «горба», а также, профили с повышенным содержанием  $FeO$  в ядре. В профилях сложной зональности можно выделить так называемый нетривиальный вид. Гранаты этого вида характеризуются явной «пилообразной» зональностью. Сюда же можно отнести профили гранатов, ядра которых имеют прямой тип зональности, в то время как к краям зерен наблюдается увеличение содержания  $MnO$ , т.е. к краю зерна происходит смена прямой зональности на обратную.

По данным О.В. Авченко прямой тип зональности указывает на возрастание степени метаморфизма и соответствует породам низких и средних ступеней метаморфизма, что объясняется следующим образом. При низких температурах метаморфизма времени его недостаточно для гомогенизации граната, т. е. скорость перемещения внешних граней кристалла, растущих за счет реакций с внешней средой, больше скорости диффузии компонентов, поступающих из внутренних зон к периферии кристалла или снаружи во внутренние зоны, следовательно, формируется химическая зональность гранатов. С увеличением температуры метаморфизма возрастает скорость диффузии компонентов, что приводит к гомогенизации гранатов и исчезновению зональности, сформированной на предыдущих низкотемпературных этапах метаморфизма.

Таким образом, породы рудного поля были подвергнуты региональному метаморфизму кианитового типа эпидот-амфиболитовой фации. Температурный диапазон, отвечающий прямой зональности, составляет 300–650 °С, при давлениях от 3 кбар. Более точное определение температур и давлений возможно по геологическим термобарометрам. Однако для исследований с их помощью необходима информация о химизме других минералов переменного состава.

### **Список литературы**

1. Авченко О. В. Петрогенетическая информативность гранатов метаморфических пород. М.: Наука, 1982. 104 с.
2. Григорьев Д. П. Рассуждения о минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 1998. 88 с.
3. Дир У. А., Хауи Р. А., Зуссман Дж. Породообразующие минералы: пер. с англ. П. П. Смолина, В. И. Финько; под ред. В. П. Петрова. М. : Мир, 1965. 372 с.
4. Добрецов Н. Л. Ревердатто В. В. Соболев В. С. Хлестов В. В. и др. Фации метаморфизма. М.: Недра, 1972. 432 с.
5. Перчук Л. Л., Лаврентьева И. В., Аранович Л. Я. и др. Биотит-гранат-кордиеритовые равновесия и эволюция метаморфизма. М.: Наука, 1983. 197 с.

6. Сизых А. И. Докембрий Бирюсинского метаморфического пояса. Иркутск: изд-во Иркут. ун-та, 1987. 240 с.

7. Сизых А. И., Буланов В. А. Кристаллохимизм породообразующих минералов: учеб. пособие. Иркутск: Иркут. ун-т, 2005. 218 с.

УДК 552.3

## МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ НИКОЛАЕВСКОЙ СОПКИ (ОКРЕСТНОСТИ Г. КРАСНОЯРСКА)

**О.М. Карнаухова**

**Научные руководители канд. геол.-минерал. наук О.Ю. Перфилова,  
д-р геол.-минерал. наук А.М. Сазонов**

*Сибирский федеральный университет*

В районе города Красноярска присутствуют различные магматические образования, представленные породами разнообразного состава. Время одного из наиболее интенсивных проявлений вулканизма – поздний ордовик. Вулканогенными породами этого возраста сложена гряда Долгая Грива. Самой восточной, ярко выраженной вершиной гряды является гора Николаевская (Первая) Сопка. Она сложена разнообразными породами магматического происхождения – как эффузивными, входящими в состав дивногорской толщи, так и субвулканическими, слагающими лакколиты и дайки.

Цель работы: выяснение различий и сходства между породами из разных геологических тел Николаевской сопки и её окрестностей с использованием микроскопического метода изучения пород.

В нижней части разреза вулканитов преобладают базальты, а в верхней – эффузивы среднего состава повышенной щелочности (трахиты). Также выявлено значительное количество жерловых и субвулканических тел, представленных ро, микросиенитами, сиенит-порфирами и эффузивными брекчиями базальтового состава. Мощность даек субвулканических пород – 0,5–0,6 м.

Вулканические породы покровной фации слагают моноклираль с пологим (около 30°) падением на север. В строении вулканогенного разреза выделяется 6 различных по петрографическому составу пачек. Первая пачка ( $O_{2-3}dv^1$ ) – свежие чёрные базальты с крупнопорфировой структурой (рис. 1). Лавовые потоки чётко проявлены в рельефе



*Рис. 1. Порфировый  
базальт первой пачки*



на южных склонах Долгой гривы и её отрогов в виде субширотных уступов. Мощность пачки не менее 360 м [1, 2]. Текстура базальтов плотная, флюидальная – фенокристаллы ориентированы в направлении течения расплава. В составе порфировых выделений резко преобладают лейсты плагиоклаза размером до 2–3 см, слагающие до 20–25 % объёма породы, значительно реже наблюдаются немногочисленные фенокристаллы клинопироксена. На свежей поверхности пород плагиоклаз тёмно-серого цвета, при выветривании он становится светло-серым и на фоне основной массы бурого цвета выделяется ярким стеклянным блеском.

Вторая пачка ( $O_{2-3}dv^2$ ) сложена афировыми и мелкопорфировыми базальтами, в верхней части потоков – миндалекаменными. Структура пород мелкопорфировая, размер фенокристаллов всего в 2,5–3 раза превышает размер микролитов основной массы. Порфировые выделения в базальтах представлены лейстами плагиоклаза. Размер порфировых выделений в среднем – 1–3 мм, содержание – до 10 %. Микроструктура основной массы интерсертальная – доля микролитов в объёме основной массы достигает 85 %. Мощность пачки 150–250 м, она постепенно увеличивается в северо-восточном направлении.

Третья пачка ( $O_{2-3}dv^3$ ) сложена лапиллиево-пепловыми туфами преимущественно трахитового состава. Цвет породы зеленовато-розовый. На фоне основной массы макроскопически различаются кристаллокласты полевого шпата и обломки пород розового, лилового и серо-зелёного цвета, имеющие размеры преимущественно до 1 мм. Присутствуют единичные обломки базальтов размерами до 1 см. Микроструктура неравномерно (преимущественно тонкообломочная) литокристаллокластическая. Обломки пород составляют 5–10 %, обломки минералов (плагиоклаза и пироксена) – 15–20 %. Обломки трахитов и базальтов мелкие, оплавленные, узнаются по характерным микроструктурам. Обломки плагиоклаза и пироксена сильно изменены, замещены вторичными минералами (плагиоклаз – хлоритом, серицитом, эпидотом, пироксен полностью замещен хлоритом). Цемент базальтовый имеет карбонатно-хлоритовый состав, в нём присутствуют сферолиты кальцита и хлорита. Мощность пачки около 260 м.

Четвёртая пачка ( $O_{2-3}dv^4$ ) сложена мелкопорфировыми трахитами серо-лилового цвета. Текстура пород преимущественно массивная, но иногда чётко выражена флюидальность, которая более отчётливо проявляется при выветривании. В породе присутствуют немногочисленные фенокристаллы калиевого полевого шпата размером 0,8х0,45 мм и реликты вкрапленников пироксенов размерами 0,1–0,4 мм, полностью замещенных хлоритом. Основная масса сложена микролитами альбита длиной 0,2–1,5 мм и толщиной 0,05–0,2 мм, а также продуктами девитрификации вулканического стекла (хлоритом, кальцитом и рудным минералом). Мощность пачки около 550 м.

Пятая пачка ( $O_{2-3}dv^5$ ) сложена афировыми и мелкопорфировыми базальтами. В целом породы данной пачки и внешне, и микроскопически схожи с базальтами второй пачки. Мощность около 560 м.

Шестая пачка ( $O_{2-3}dv^6$ ) развита на северо-западе изучаемой территории. Из-за плохой обнаженности большая часть наблюдений проводилась в придорожных выемках, по щебню. Ранее трахиты разрабатывались для производства щебня, ко-



торым отсыпались дороги. В настоящее время карьеры законсервированы. Пачка сложена массивными трахитами сиреневатого цвета, порфировой структуры. Порфиновые вкрапленники пироксена размером 0,1–2 мм и альбита размером 0,2–1,5 мм в длину и 0,05–0,5 мм в ширину составляют 10–15 % от объёма породы. Основная масса сложена микролитами альбита длиной 0,05–0,3 мм и толщиной 0,01–0,03 мм, мелкими кристалликами пироксена, продуктами девитрификации вулканического стекла. Также в породе присутствуют миндалины, выполненные хлоритом и кварцем и составляющие до 10 % от объёма породы.

Во всех эффузивных породах вулканическое стекло девитрифицировано и представлено продуктами раскристаллизации и замещения – хлоритом, кальцитом, рудными минералами и лейкоксеном.

Субвулканические образования представлены интрузией кварцевых сиенит-порфиров и дайками основного состава. Кварцевые сиенит-порфиры ( $\xi\text{лO}_{2-3}\text{dv}$ ) слагают лакколит в восточной части участка (в районе гор Николаевская Сопка и Вторая Сопка) [3]. Сиенит-порфиры имеют розовый цвет, плотную, массивную текстуру, порфировидную структуру с мелкозернистой структурой основной массы (размерность около 0,5 мм). Порфиновые выделения представлены ортоклаз-пертитом, размером от 3 до 5 мм, слагающим 10–15 % объёма породы. Основная масса представлена более мелкими кристаллами ортоклаза (от 0,05\*0,2 мм до 0,2\*0,5 мм) и кварца (рис. 2). Минералы в шлифе интенсивно окрашены гидроокислами железа в красновато-бурый цвет, особенно по границам между зёрнами и по трещинам.

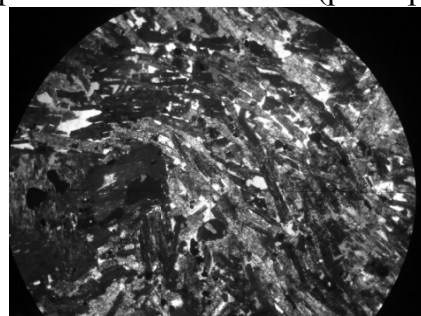


Рис. 2. Сиенит-порфир под микроскопом

Дайка микрогаббро ( $\text{mvO}_{2-3}\text{dv}$ ) наблюдается на южном склоне горы Николаевская Сопка внутри субвулканической интрузии кварцевых сиенит-порфиров. Мощность дайки около 3 м, азимут падения 255°,  $\angle$  50°. Микрогаббро имеет буровато-серый цвет. Текстура плотная, однородная. Структура порфировидная с тонкозернистой основной массой (размер выделений минералов менее 1 мм). Фенокристаллы представлены таблитчатыми кристаллами плагиоклаза тёмно-серого цвета размерами 5–7 мм, ориентированными незакономерно.

Выводы: Николаевская Сопка сложена пластовыми телами базальтов, туфов и трахитов. В базальтах плагиоклаз сильно альбитизирован. Кроме того, в базальтах первой пачки в качестве порфировых вкрапленников отмечен пироксен, не установленный при макроскопическом изучении. Наличие вкрапленников свидетельствует об условиях сжатия в процессе внедрения магмы. Базальты второй пачки – афировые, что может быть связано с поступлением магмы в вулканический аппарат в условиях растяжения земной коры. В трахитах микролиты основной массы и участками – вкрапленники сложены не калиевым полевым шпатом, а метасоматическим альбитом. В эффузивных породах вулканическое стекло полностью девитрифицировано и представлено тонкозернистым агрегатом хлорита, кальцита, рудного минерала и, участками, лейкоксеном. Миндалины и трещины заполнены гидротермальными агрегатами хлорита и карбонатов.

### **Список литературы**

1. Перфилова О. Ю., Махлаев М. Л., Сидорас С. Д. Ордовикская вулканоплутоническая ассоциация Качинско-Шумихинской депрессии // Литосфера. 2004. № 3. 20 С. 137–152.
2. Перфилова О. Ю., Махлаев М. Л. Ордовикская вулканно-плутоническая ассоциация Качинско-Шумихинской депрессии // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Центральной Сибири. Мат-лы юбилейной науч.-практ. конф., г. Красноярск, 25–26 марта 2010 г. Красноярск, 2010. С. 240–246.
3. Сазонов А. М., Цыкин Р. А., Ананьев С. А., Перфилова О. Ю., Махлаев М. Л., Сосновская О. В. Путеводитель по геологическим маршрутам в окрестностях города Красноярска. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. 212 с.

## **МАТЕМАТИКА ИНФОРМАТИКА**

### ***1. АЛГЕБРА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЛОГИКА И ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИКА***

УДК 512.5

### **МАКСИМАЛЬНЫЕ КОММУТАТИВНЫЕ ИДЕАЛЫ ПОДАЛГЕБРЫ $N\Phi(K)$ АЛГЕБР ЛИ ТИПА $F_4$**

**Е.А. Кравцова**

**Научный руководитель д-р физ.-мат. наук В.М. Левчук**

*Сибирский федеральный университет*

Пусть  $\Phi$  – некоторая система корней евклидова пространства,  $\Pi$  – её база,  $\Phi^+$  – положительная система корней.

Алгебра Шевалле типа  $\Phi$  над полем  $K$  характеризуется базисом Шевалле  $\{e_r(r \in \Phi^+), h_s(s \in \Pi)\}$ . Её подалгебру с базисом  $\{e_r(r \in \Phi^+)\}$  будем обозначать  $N\Phi(K)$ .

Целью данного исследования является описание максимальных коммутативных идеалов алгебры  $N\Phi(K)$  для случая  $\Phi = F_4$ .

Через  $\{r\}^+$  обозначим множество корней  $s \in \Phi^+$  таких, что в разложении по базе корня  $s - r$  все коэффициенты неотрицательны. Тогда  $T(r)$  определим как

подалгебру в  $N\Phi(K)$  с базисом  $\{e_s \mid s \in \{r\}^+\}$ . Аналогично  $Q(r)$  определим как подалгебру в  $N\Phi(K)$  с базисом  $\{e_s \mid s \in \{r\}^+ \setminus \{r\}\}$ .

Если  $H \subseteq T(r_1) + T(r_2) + \dots + T(r_m)$  и это включение нарушается при любой замене  $T(r_i)$  на  $Q(r_i)$ , то назовём  $\{r_1, r_2, \dots, r_m\} = \mathcal{L}(H)$  множеством углов для  $H$ .

**Теорема.** Максимальный коммутативный идеал алгебры  $NF_4(K)$  над полем  $K = 2K$  совпадает с  $T(q_{3,-2})$ ,  $T(p_{4,-1}) + T(q_{43})$  или с  $T(p_{4,-1}) + K(e_{q_{3,-2}} + de_{q_{42}})$ ,  $d \in K$ .

**Лемма.** Пусть  $M$  есть некоторое подмножество алгебры  $NF_4(K)$  над полем  $K$  характеристики 2. Тогда если его множество углов  $\mathcal{L}(M)$  имеет непустое пересечение с множеством  $\{q_{32}, q_{21}, q_{10}, p_{32}, q_{20}, p_{31}, q_{2,-1}, p_{3,-1}\}$ , то  $M$  не будет являться коммутативным идеалом данной алгебры.

УДК 519.46

## ПРИМЕРЫ НЕЗАМКНУТЫХ КОВРОВ АДДИТИВНЫХ ПОДГРУПП

**С.К. Куклина, А.О. Лихачёва**

**Научный руководитель д-р физ.-мат. наук, проф. Я.Н. Нужин**

*Сибирский федеральный университет*

Пусть  $\Phi$  – приведенная, неразложимая система корней ранга  $l$ ,  $E(\Phi, K)$  – элементарная группа Шевалле типа  $\Phi$  над коммутативным кольцом  $K$  с единицей.

Группа  $E(\Phi, K)$  порождается своими корневыми подгруппами

$$X_r = x_r(K) = \{x_r(t) \mid t \in K\}, \quad r \in \Phi.$$

Подгруппы  $X_r$  абелевы и для каждого  $r \in \Phi$  и любых  $t, u \in K$  справедливо соотношение

$$x_r(t)x_r(u) = x_r(t + u).$$

Назовем *элементарным ковром* типа  $\Phi$  ранга  $l$  над  $K$  всякий набор аддитивных подгрупп

$$\mathfrak{A} = \{\mathfrak{A}_r \mid r \in \Phi\}$$

кольца  $K$  с условием

$$C_{ij,rs} \mathfrak{A}_r^i \mathfrak{A}_s^j \subseteq \mathfrak{A}_{ir+js}, \quad \text{при } r, s \in ir + js \in \Phi, \quad i > 0, \quad j > 0, \quad (*)$$

где

$$\mathfrak{A}_r^i = \{a^i \mid a \in \mathfrak{A}_r\},$$

а константы  $C_{ij,rs} = \pm 1, \pm 2, \pm 3$  определяются коммутаторной формулой Шевалле

$$[x_s(u), x_r(t)] = \prod_{i,j>0} x_{ir+js}(C_{ij,rs}(-t)^i u^j), r, s, r+s \in \Phi.$$

Здесь и далее  $[x, y] = x^{-1}y^{-1}xy$ . Всякий ковер  $\mathfrak{A}$  типа  $\Phi$  над  $K$  определяет кововую подгруппу

$$E(\Phi, \mathfrak{A}) = \langle x_r(\mathfrak{A}_r) \mid r \in \Phi \rangle$$

группы Шевалле  $E(\Phi, K)$ , где  $\langle M \rangle$  – подгруппа, порожденная множеством  $M$ . Ковер  $\mathfrak{A}$  типа  $\Phi$  ранга  $l$  над кольцом  $K$  называется *замкнутым (допустимым)*, если его кововая подгруппа  $E(\Phi, \mathfrak{A})$  не имеет новых корневых элементов, т. е.

$$E(\Phi, \mathfrak{A}) \cap X_r = \langle x_r(\mathfrak{A}_r) \mid r \in \Phi \rangle.$$

В. А. Койбаев (Тр. ИММУРО РАН. 2011. Т. 17. № 4. С. 134–141) построил пример незамкнутого ковра со всеми, не равными нулю, аддитивными подгруппами для типа  $A_l$  на матричном языке. В дипломной работе А.М. Потаповой был построен аналогичный пример для групп Шевалле, ассоциированных с системами корней, все корни которых имеют одинаковую длину. В данной работе строятся аналогичные примеры для групп Шевалле любых типов.

Далее  $F[x]$  – кольцо многочленов над полем  $F(x)$ . Множество

$$R = \{f \in F(x) \mid \deg f \geq 2\}$$

всех многочленов степени не меньше двух является идеалом кольца  $F(x)$ . Пусть  $\Pi = \{r_1, r_2, \dots, r_l\}$  – фундаментальная система корней системы  $\Phi$ , где  $r_1$  – короткий корень. Определим набор аддитивных подгрупп  $\mathfrak{A} = \{\mathfrak{A}_r \mid r \in \Phi\}$  следующим образом. Полагаем

$$\mathfrak{A}_{r_1} = A,$$

$$\mathfrak{A}_{-r_1} = B,$$

$$\mathfrak{A}_r = R, \quad r \in \Phi, \quad r \neq r_1, -r_1,$$

где

$$A = F + R,$$

$$B = F + x + R.$$

Покажем, что набор  $\mathfrak{A} = \{\mathfrak{A}_r \mid r \in \Phi\}$  является ковром.

Если сумма  $r + s$  корней  $r, s$  является корнем, то все три корня  $r, s, r + s$  лежат в некоторой подсистеме корней ранга два системы  $\Phi$ . Поэтому достаточно проверить условия ковровости (\*) для систем корней  $\Phi_2$  типа  $A_2, B_2, G_2$ . Пусть  $\{a, b\}$  — база системы корней  $\Phi_2$ . Справедливы следующие коммутаторные формулы:

$$x_a(t), x_b(u) = x_{a+b}(\pm tu);$$

$$[x_a(t), x_b(u)] = x_{a+b}(\pm tu)x_{2a+b}(\pm t^2u);$$

$$[x_a(t), x_{a+b}(u)] = x_{2a+b}(\pm 2tu).$$

Возможны следующие три случая:

$$1) \mathfrak{A}_a = A, \mathfrak{A}_{-a} = B, \mathfrak{A}_r = R, r \in \Phi_2, r \neq \mp a;$$

$$2) \mathfrak{A}_a = B, \mathfrak{A}_{-a} = A, \mathfrak{A}_r = R, r \in \Phi_2, r \neq \mp a.$$

$$3) \mathfrak{A}_r = R, r \in \Phi_2.$$

Так как  $RA \subseteq R, RB \subseteq R, RR \subseteq R$ , в силу того, что  $R$  — идеал, и по определению  $R \subseteq A \cap B$ , то указанные выше формулы дают условия ковровости.

Далее, так как  $1 \in A \cap B$ , то

$$n_{r_1} = x_{r_1}(1)x_{-r_1}(-1)x_{r_1}(1) \in E(\mathfrak{A}),$$

а, следовательно,

$$n_{r_1}^{-1}x_{-r_1}(x)n_{r_1} = x_{r_1}(x) \in E(\mathfrak{A}).$$

Но  $x \notin \mathfrak{A}_{r_1}$  по определению аддитивной подгруппы  $\mathfrak{A}_{r_1}$ . Таким образом, ковер  $\mathfrak{A}$  не является замкнутым.

УДК 511.52

## ГЕРОНОВЫ И ТИАНОВЫ ТРЕУГОЛЬНИКИ

**Н.Е. Чёрная**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук Т.Ю. Войтенко**

*Лесосибирский педагогический институт — филиал  
Сибирского федерального университета*

Треугольник, у которого площадь  $S$  и стороны  $x, y, z$  выражаются натуральными числами, называют *героновым* треугольником. Геронов треугольник  $\langle x, y, z; S \rangle$  называется *основным*, если его стороны  $x, y, z$  взаимно просты, т. е.  $(x, y, z) = 1$ .

Вызывает интерес задача о нахождении всех героновых треугольников. Домножая длины сторон такого треугольника на соответствующий общий множитель, можно получить подобный треугольник с целочисленными сторонами и площадью, поэтому по формуле Герона эта задача сводится к решению в целых числах  $a, b, c, S$  уравнения:

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

где  $p = (a+b+c)/2$ . Брахмагупта (индийский математик и астроном, 598–660 гг.) нашел его решение в параметрическом виде: длины сторон целочисленного геронова треугольника равны

$$k(m^2 + n^2), n(m^2 + k^2), (n+k)(m^2 - nk),$$

где  $k, m, n$  – произвольные натуральные числа, причем  $m^2 > nk$ ; при этом площадь треугольника равна  $ktn(m+n)(m^2 - nk)$ . Несколько примеров таких треугольников:

$$(3, 4, 5), (5, 5, 6), (5, 5, 8), (6, 8, 10), (10, 10, 12), \\ (5, 12, 13), (10, 13, 13), (9, 12, 15), (4, 13, 15), \dots$$

Заметим, что все эти примеры, кроме последнего – пифагоровы треугольники, то есть прямоугольные треугольники с целочисленными сторонами или равнобедренные треугольники, состоящие из двух равных пифагоровых. Треугольник из последнего примера состоит из двух неравных пифагоровых треугольников со сторонами  $(12/5, 16/5, 4)$  и  $(16/5, 63/5, 13)$  с общим катетом длины  $16/5$ . Нетрудно показать, что любой геронов треугольник либо прямоугольный (пифагоров), либо составлен из двух пифагоровых.

Вопросу отыскания героновых треугольников посвящены работы Брадиса, Сычикова, Серпинского, Поповича, Осипяна и др. В последние десятилетия этой темой активно занимается Кожегельдинов. В [1] приведен ряд эквивалентных общих формул, каждая из которых описывает все основные героновы треугольники. Приведем одну из них:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{(a+b)(ac^2 - bd^2)}{(ac^2 - bd^2, bd^2(a+b))}, & y &= \frac{ab(c^2 + d^2)}{(ac^2 - bd^2, bd^2(a+b))}, \\ z &= \frac{a^2c^2 + b^2d^2}{(ac^2 - bd^2, bd^2(a+b))}, & S &= \frac{abcd(a+b)(ac^2 - bd^2)}{(ac^2 - bd^2, bd^2(a+b))^2}, \end{aligned} \right\}$$

где

$$a, b, c, d \in \mathbb{N}, \quad ac^2 > bd^2, \quad (a, b) = (c, d) = 1.$$

Геронов треугольник  $\langle x, y, z; S \rangle$ , площадь которого выражается квадратом натурального числа  $A$ , назовем *тиановым* треугольником. Тианов треугольник  $\langle x, y, z; A^2 \rangle$ , стороны которого  $x, y, z$  выражаются взаимно простыми числами, назовем *основным*. Хотя известно значительное число основных тиановых треугольников, не существует общей формулы, описывающей все эти треугольники,

т. е. вопрос о параметризации всех основных тиановых треугольников остается открытым (см. [2], Problem 6628).

Вопрос о нахождении общей формулы всех основных тиановых треугольников сводится к решению в натуральных числах диофантова уравнения четвертой степени с четырьмя неизвестными  $\alpha, \beta, \gamma, A$ :

$$\alpha\beta\gamma(\alpha + \beta + \gamma) = A^4,$$

где

$$\alpha, \beta, \gamma, A \in \mathbb{N}, (\alpha, \beta, \gamma) = 1.$$

Отметим, что если  $x, y, z$  – стороны и  $S$  – площадь основного тианова треугольника, то  $x = \alpha + \beta$ ,  $y = \beta + \gamma$ ,  $z = \gamma + \alpha$ ,  $S = A^2$ , где  $\alpha, \beta, \gamma, A \in \mathbb{N}, (\alpha, \beta, \gamma) = 1$ .

Общее решение этого уравнения в натуральных числах неизвестно. Но в работах [3], [4] показано, что это уравнение имеет бесконечное множество основных решений в натуральных числах  $\alpha, \beta, \gamma, A$ .

Мы покажем, что если выбрать натуральное число  $m$  такое, что  $\frac{1}{2}(m^2 - 1)$  есть квадрат, то треугольники со сторонами  $(\frac{1}{2}(m^3 + m^2) - 1, \frac{1}{2}(m^3 - m^2) + 1, m^2)$  и  $(m^3 - \frac{1}{2}(m - 1), m^3 - \frac{1}{2}(m + 1), m)$  имеют площади, являющиеся квадратом натурального числа.

Пусть  $a = \frac{1}{2}(m^3 + m^2) - 1$ ,  $b = \frac{1}{2}(m^3 - m^2) + 1$ ,  $c = m^2$  стороны треугольника. Тогда периметр  $2s = m^3 + m^2$ , и поэтому  $s - a = 1$ ,  $s - b = m^2 - 1$ ,  $s - c = \frac{1}{2}(m^3 - m^2)$ . Воспользовавшись формулой Герона  $\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$  для площади треугольника со сторонами  $(a, b, c)$  и периметром  $2s$  получаем, что площадь треугольника  $\Delta$  равна  $\frac{1}{2}m^2(m^2 - 1)$ .

Аналогично проверяется второй случай.

Предположим, что  $\frac{1}{2}(m^2 - 1) = n^2$ . Тогда  $m^2 - 2n^2 = 1$ . Решениями этого уравнения являются, например, пары  $(m, n) = (3, 2), (17, 12)$ , которые приводят к тиановым треугольникам

$$(a, b, c; s, \Delta) = (17, 10, 9; 18, 36), \quad (26, 25, 3; 27, 36), \\ (2600, 2313, 289; 2601, 41616), \quad (4905, 4904, 17; 4913, 41616).$$

Уравнение  $m^2 - 2n^2 = 1$  – это уравнение Пелля. Решения этого диофантового уравнения хорошо известны.

Отметим также, что один из способов нахождения тиановых треугольников связан с решениями другого диофантового уравнения, а именно уравнения  $x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 = x_4^4$  ( $x_1, x_2, x_3, x_4 \in \mathbb{N}$ ), которое в свою очередь является частным случаем уравнением Эйлера  $x_1^n + x_2^n + \dots + x_{n-1}^n = x_n^n$ . Наименьшее известное значение  $x_4$ , для которого выполняется равенство  $x_1^4 + x_2^4 + x_3^4 = x_4^4$ , равно 422481. Наименьшая сторона соответствующего тианова треугольника тогда равна 2322892439815904960321.

### **Список литературы**

1. Кожегельдинов С. Ш. Отыскание основных героновых треугольников // Изв. АН Респ. Казахстан. Сер. физ.-мат. 1992. № 3. С. 48–51.
2. Melter R. A. Problem 6628 // Amer. Math. Monthly. 1990. V. 97. №4. P. 350; 1991. V. 98. № 8. P. 772–774.
3. Кожегельдинов С. Ш. К вопросу о тиановых треугольниках // Матем. заметки. 1993. Т. 53. № 5. С. 155–157.
4. Кожегельдинов С. Ш. Об основных тиановых треугольниках // Матем. заметки. 1997. Т. 61. № 4. С. 561–569.
5. Barbeau E. J. Pell's equation. New York: Springer, 2003.

## **2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 735.29

### **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ЗАДАЧИ**

**Н.Ю. Зуева**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук В.Е. Распопов**

*Сибирский федеральный университет*

В работе численно решена обратная коэффициентная задача для уравнения параболического типа. Описан численный метод решения поставленной обратной задачи. Рассмотрен регуляризирующий алгоритм решения обратной задачи, приводящий к решению систем линейных алгебраических уравнений с хорошо обусловленными и плохо обусловленными (в случае «малых» шагов сетки) матрицами. Для решения плохо обусловленных задач применен метод регуляризации по А. Н. Тихонову.

Среди математических задач можно выделить класс задач, в которых малые погрешности в исходных данных влекут за собой большие погрешности вычислений. Они характеризуются тем, что решение может быть неустойчиво к таким изменениям, а то и вовсе не существовать. Эти задачи принадлежат к классу некорректно поставленных задач.

Сформулируем обратную задачу нахождения коэффициента переноса для одномерного уравнения теплопроводности с граничными условиями 1-го рода. Ставится задача нахождения функции  $a(t)$ . Для уравнения теплопроводности, заданного на квадратной области  $D$ :



$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a(t) \frac{\partial u}{\partial x} + f(x, t), \quad D = \{\alpha \leq x \leq \beta; \alpha \leq t \leq \beta\},$$

рассматривается первая начально-краевая задача:

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= u_0(x), & \alpha \leq x \leq \beta, \\ u(\alpha, t) &= \psi_1(t), & \alpha \leq t \leq \beta, \\ u(\beta, t) &= \psi_2(t), & \alpha \leq t \leq \beta, \end{aligned}$$

с интегральным условием переопределения:

$$\int_{\alpha}^{\beta} u(x, t) dx = \beta(t).$$

Поставленную задачу будем решать методом конечных разностей. На дискретной области выбираем неявную разностную схему (аппроксимирующую данную задачу с  $O(\tau + h^2)$  порядком точности), которая является абсолютно устойчивой:

$$\frac{y_j^{n+1} - y_j^n}{\tau} = \frac{y_{j+1}^{n+1} - 2y_j^{n+1} + y_{j-1}^{n+1}}{h^2} + a^{n+1} \frac{y_{j+1}^n - y_{j-1}^n}{2h} + f_j^n,$$

начальное и граничные условия аппроксимируем следующим образом:

$$\begin{aligned} y_j^0 &= u_0(x_j), & j = \overline{0, M}, \\ y_0^{n+1} &= \psi_1(t_{n+1}), & y_M^{n+1} = \psi_2(t_{n+1}), & n = \overline{0, (N-1)}. \end{aligned}$$

Интегральное условие переопределения аппроксимируем с помощью квадратурной формулы трапеций:

$$\left( \frac{y_0^{n+1} + y_M^{n+1}}{2} + \sum_{j=1}^{M-1} (y_j^{n+1}) \right) h = \beta(t_{n+1}),$$

имеющей второй порядок аппроксимации по  $h$ .

Получили систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{pmatrix} b & c & 0 & \dots & 0 & 0 & K_j^n \\ a & b & c & \dots & 0 & 0 & K_j^n \\ 0 & a & b & \dots & 0 & 0 & K_j^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & b & c & K_{M-2}^n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a & b & K_{M-1}^n \\ h & h & h & \dots & h & h & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} y_1^{n+1} \\ y_2^{n+1} \\ y_3^{n+1} \\ \vdots \\ y_{M-2}^{n+1} \\ y_{M-1}^{n+1} \\ a^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1^n \\ y_2^n \\ y_3^n \\ \vdots \\ y_{M-2}^n \\ y_{M-1}^n \\ B_{n+1} \end{pmatrix} + \tau * \begin{pmatrix} f_1^n \\ f_1^n \\ f_1^n \\ \vdots \\ f_{M-2}^n \\ f_{M-1}^n \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{y_0^{n+1}}{h^2} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{y_M^{n+1}}{h^2} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} a &= -\frac{\tau}{h^2} = c, \quad b = \frac{1}{\tau} + \frac{2}{h^2}, \quad K_j^n = -\frac{\tau(y_{j+1}^n - y_{j-1}^n)}{2h}, \\ B_{n+1} &= \beta(t_{n+1}) - \frac{h(y_0^{n+1} - y_M^{n+1})}{2}. \end{aligned}$$

Полученную систему линейных алгебраических уравнений  $Ay = B$  решаем методом исключения. Однако, при малых параметрах  $h$  матрица  $A$  становится плохо обусловленной, так как элементы последней строки близки к нулю. В связи с этим в данной ситуации требуется вводить регуляризующие алгоритмы, с помощью которых можно решать поставленную задачу при малых  $h$ .

Идея метода регуляризации состоит в замене исходной некорректной задачи на задачу о минимизации следующей функции:

$$\Omega(Y, \lambda) = |AY - B| + \lambda|Y - Y_0|,$$

где  $\lambda$  — малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать определенным способом. Минимизируя функцию  $\Omega(Y, \lambda)$ , можно получить регуляризованное решение  $Y(A)$ , зависящее от параметра  $\lambda$ . Из формулы хорошо ясен его смысл: при малых  $\lambda \sim 0$  задача близка к (некорректной) исходной задаче, а при больших  $\lambda$ , задача поставлена корректно, но ее решение далеко от решения исходной обратной задачи. Очевидно, что на практике необходимо выбирать промежуточные  $\lambda$ . Можно показать, что в линейном случае задача о минимизации функционала  $\Omega(Y, \lambda)$  может быть сведена к следующей системе линейных алгебраических уравнений:

$$(A^T A + \lambda I)Y = A^T B. \quad (1)$$

Заменим нашу систему линейных алгебраических уравнений  $Ay = B$  системой (1).

Для определения параметра  $\lambda$  будем использовать метод выбора параметра регуляризации по L-кривой (L-curve method), где параметр регуляризации выбирается в точке с максимальной кривизной линии L, строящейся на графике:

$$L = \{(\log(\|x_\lambda\|), \log(\|Ax_\lambda - B\|))\}.$$

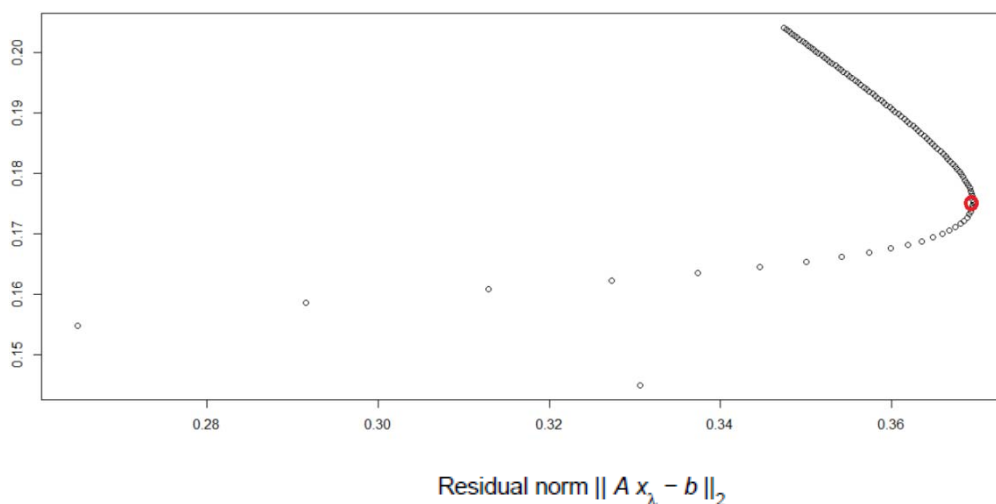


Рис. 1

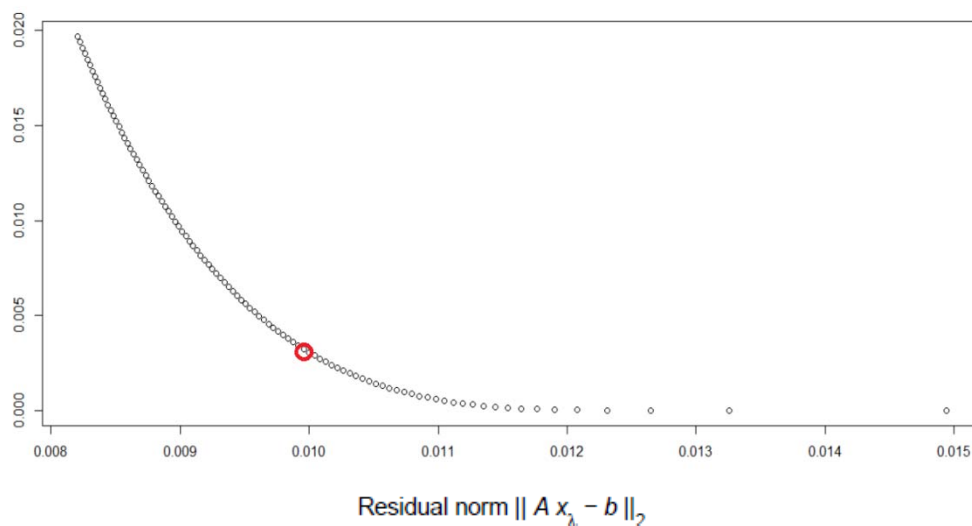


Рис. 2

На рис. 1, 2 изображены характерные графики L-кривой. В отмеченных точках наблюдается максимальная кривизна линии, именно в этих точках требуется выбирать соответствующий параметр регуляризации  $\lambda$ .

Приведем результаты вычислительного эксперимента. Применим метод регуляризации А.Н. Тихонова с выбором параметра регуляризации  $\lambda$  по L-кривой на малой пространственно-временной области. Показаны результаты численного эксперимента для некоторых пробных функций. Установлена сходимость численного решения к точному при «больших»  $h$ , а так же сходимость метода регуляризации А. Н. Тихонова с выбором параметра регуляризации по L-кривой при «малых»  $h$  (с увеличением количества разбиений снижаются абсолютная и относительная погрешности). В табл. 1, 2 показаны результаты вычислительных экспериментов для различных тестовых функций  $u(x, t)$ .

$$1. \quad u(x, t) = e^{-t} \sin(x), \quad \begin{aligned} 0 < x < 0,001, \\ 0 < t < 0,001. \end{aligned}$$

**Таблица 1.** Результаты вычислений для первой тестовой функции

h, шаг аппроксимации	Абсолютная погрешность $ u_n - u_e $	Относительная погрешность $\frac{ u_n - u_e }{u_n}$
0,0001	6,197219e-05	0,1304677
0,00005	3,916344e-05	0,0803586
0,00002	1,811362e-05	0,03660015
0,000015	1,330717e-05	0,02681028
0,00001	Число обусловленности= 2,21989e+16 =>используем метод регуляризации	
0,00001	1,08707e-05	0,01136276
0,000007	7,577085e-06	0,007945634
0,000001	8,233545e-07	0,000562841

$$2. \quad u(x, t) = x^2 + t^2, \quad \begin{aligned} 0 < x < 0,01, \\ 0 < t < 0,01. \end{aligned}$$

**Таблица 2.** Результаты вычислений для второй тестовой функции

Н, шаг аппроксимации	Абсолютная погрешность $ u_n - u_e $	Относительная погрешность $\frac{ u_n - u_e }{u_n}$
0,001	1,000298e-05	0,3828619
0,0005	7,022792e-06	0,2795348
0,0002	3,463134e-06	0,0574696
0,00015	2,576432e-06	0,0197805
0,00001	Число обусловленности= 9,40783e+19 =>используем метод регуляризации	
0,00001	1,961168e-06	0,01960302
0,000007	4,841259e-05	0,00271830
0,000001	6,193781e-04	0,00063843

### Список литературы

1. Самарский А. А., Николаев Е. С., Методы решения сеточных уравнений. М., 1978.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
3. Cannon J. R., Duchateau P. Determination unknowing coefficients in a none-liner conduction problem // SIAM J. appl. math. 1973. V. 24. № 3. P. 298–314.
4. Hansen P. C. Section for Scientific Computing [Электронный ресурс] // Электрон. текст. дан. Chapter 5: Parameter Choice Methods. Режим доступа: <http://www.imm.dtu.dk/~pcha/DIP/chap5.pdf>.

УДК 51-73

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИВЫХ ДОБЕГАНИЯ В ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЯХ РУСЛОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СТОКА

**В.С. Корниенко**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук, доц. Е.Д. Карпова**

*Институт математики и фундаментальной информатики СФУ*

Одной из основных проблем моделей стока, ориентированных на применение в гидрологических прогнозах, является крайне ограниченное информационное гидрометеорологическое обеспечение. На практике получили развитие модели, оперирующие с некоторыми осредненными по территории укрупненными показа-

телями, отражающими в обобщающем виде реально протекающие природные процессы [1].

Важное место в существующих моделях стока отводится описанию движения воды в русловой сети. На практике применяется метод расчета, основанный на использовании кривой добегания  $\varphi(t)$  [1], с помощью которой гидрограф притока в русловую сеть речного бассейна  $q(t)$  преобразуется в гидрограф стока в замыкающем створе  $Q(t)$ . Например, для бесприточного участка русла используется интеграл свертки  $Q(t) = \int_0^t \varphi(\tau) q(t-\tau) d\tau$ , который является решением линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами и нулевыми начальными данными.

Известны несколько способов установления кривой добегания: метод единичного гидрографа, метод изохрон, линейная и вероятностная модели добегания [1].

Линейные модели руслового добегания основаны на предположении, что любая гидрологическая система представляет некоторую емкость  $W$  (или систему емкостей  $\{W_i\}_{i=1}^n$ ), трансформирующую поступающий в нее приток  $q(t)$  [2]. Для каждой емкости этот процесс может быть описан уравнением водного баланса  $\frac{dW}{dt} = Q(t) - q(t)$  и так называемой «кривой объемов»

$$W(t) = F(q(t), Q(t), c), \quad (1)$$

выражающей зависимость объема заполнения емкости  $W(t)$  от притока  $q(t)$  на входе, расхода  $Q(t)$  на выходе и набора параметров  $c$ , характеризующих систему емкостей. Кривая объемов, как правило, описывается линейным (алгебраическим или дифференциальным) уравнением.

В работах [1–2] дано статистико-вероятностное обоснование метода кривых добегания, что позволяет получить формулы для оценки параметров плотности распределения времени добегания элементарных объемов воды для участка русла либо для речного бассейна. В вероятностных моделях кривая добегания рассматривается как плотность распределения времени добегания элементарных объемов воды в гидрологической системе. Для ее аппроксимации используются функции плотности распределения вероятностей (гамма-распределение, распределение Бровковича, Крицкого – Менкеля [1]). Моменты кривой добегания, необходимые для описания плотности распределений, оцениваются на основе теоретических зависимостей и имеющихся данных наблюдений [1]. После этого обычно производится настройка набора параметров  $c$  из (3) для конкретной гидрологической системы с помощью методов оптимизации.

В настоящей работе проанализировано использование нескольких кривых добегания, применяющихся на практике, а также описанных в литературе:

– КД1 – кривая добегания Калинина – Милюкова для одного характерного участка ( $n = 1$ ). Параметр для оптимизации: среднее время добегания  $\bar{\tau}$ ;

– КД2 – кривая добегания Калинина – Милюкова для нескольких характерных участков ( $n = n_{opt}$ ,  $n$  – целое). Параметры для оптимизации: среднее время добегания  $\bar{\tau}$ , количество характерных участков  $n$ ;

– КД3 – кривая добегания на основе  $\Gamma$ -распределения с учетом минимального времени добегания  $\tau_{min}$ . Параметры для оптимизации: средняя скорость добегания  $\bar{v}$ , коэффициент продольного рассеяния  $a$ , минимальное время добегания  $\tau_{min}$  [1];

– КД4 – кривая добегания Бровковича. Параметры для оптимизации: средняя скорость добегания  $\bar{v}$ , коэффициент продольного рассеяния  $a$  и отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту эксцесса  $k = \frac{C_s}{C_v}$ ;

– КД5 – кривая добегания при неоднозначности кривой объемов. Параметры для оптимизации: средняя скорость добегания  $\bar{v}$ , коэффициент продольного рассеяния  $a$  [1];

– КД6 – кривая добегания при неоднозначности кривой объемов для нескольких характерных участков ( $n = n_{opt}$ ,  $n$  – целое). Параметры для оптимизации: средняя скорость добегания  $\bar{v}$ , коэффициент продольного рассеяния  $a$ , количество характерных участков  $n$  [1].

В качестве данных наблюдений были взяты данные по двум натурным экспериментам, считающимся в гидрологии эталонными.

1. Наблюдения за прохождением специального попуска ГЭС на двух участках (20,61 км и 27,76 км) на р. Тверца ниже Новотверецкой ГЭС [3]. Наблюдения ГГИ на р. Тверце освещают влияние широкой, местами заросшей, поймы на неустановившееся движение воды [1].

2. Наблюдения за прохождением Специального попуска ГЭС на участке (24,9 км) на р. Верхняя Волга ниже Ивановской ГЭС [4]. Пойма на исследуемом участке реки, напротив, оказывает незначительное влияние на прохождение попуска [1].

В табл. 1 приведены значения критерия оптимальности  $S = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (Q(t_i) - Q_i^{num})^2$  для рек Тверцы и Верхняя Волга. В табл. 2 приведены полученные оптимальные параметры соответствующих кривых добегания. На рис. 1, 2, 5 приведены кривые добегания, давшие два лучших значения критерия оптимальности для исследуемых участков. На рис. 3, 4, 6 приведен попуск ГЭС, фактический и рассчитанный по этим кривым добегания расходы в нижнем створе.

**Таблица 1.** Значения критерия оптимальности  $S$

Длина участка, км	КД1	КД2	КД3	КД4	КД5	КД6
для реки Тверцы ниже Новотверецкой ГЭС						
20,61	4,34	<b>3,83</b>	<b>3,73</b>	<b>3,01</b>	5,3	5,3
27,76	5,26	<b>1,88</b>	<b>1,76</b>	3,04	<b>1,88</b>	<b>1,88</b>
для реки Верхняя Волга ниже Ивановской ГЭС						
24,9	17,28	11,27	<b>9,23</b>	<b>8,87</b>	12,05	11,98

**Таблица 2.** Значения оптимальных параметров кривых добегания

Длина участка, км	КД1	КД2	КД3	КД4	КД5	КД6
для реки Тверцы ниже Новотверцовской ГЭС						
20,61	$m_1 = 32,8$	$m_1 = 23,6$ $n_{opt} = 2$	$m_1 = 28,52$ $\sigma = 21,4$	$m_1 = 23,54$ $\sigma = 23,484$ $C_s = 0,357$ $C_v = 0,997$	$m_1 = 32,9$ $\sigma = 22,97$	$m_1 = 32,9$ $\sigma = 22,83$ $n_{opt} = 1$
27,76	$m_1 = 69,4$	$m_1 = 60,7$ $n_{opt} = 4$	$m_1 = 36,03$ $\sigma = 28,1$	$m_1 = 31,9$ $\sigma = 22,9$ $C_v = 0,718$ $C_s = 0,574$	$m_1 = 58,0$ $\sigma = 41,4$	$m_1 = 58,0$ $\sigma = 41,4$ $n_{opt} = 1$
для реки Верхняя Волга ниже Ивановской ГЭС						
24,9	$m_1 = 14,7$	$m_1 = 14,21$ $n_{opt} = 4$	$m_1 = 11,1$ $\sigma = 10,19$	$m_1 = 8,99$ $\sigma = 9,21$ $C_s = 1,02$ $C_v = 1,33$	$m_1 = 14,54$ $\sigma = 10,5$	$m_1 = 13,87$ $\sigma = 8,54$ $n_{opt} = 4$

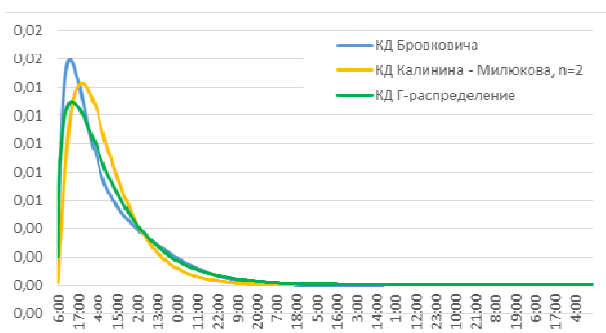


Рис. 1. Кривые добегания для участка реки Тверцы длиной 20,61 км

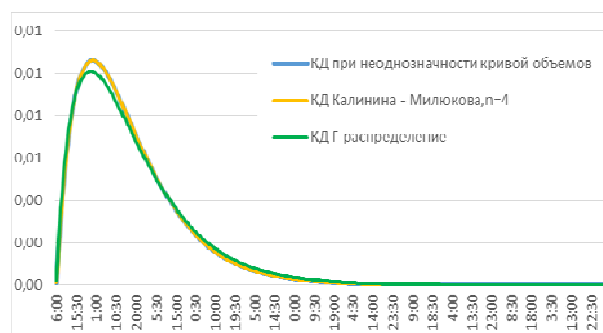


Рис. 2. Кривые добегания для участка реки Тверцы длиной 27,76 км

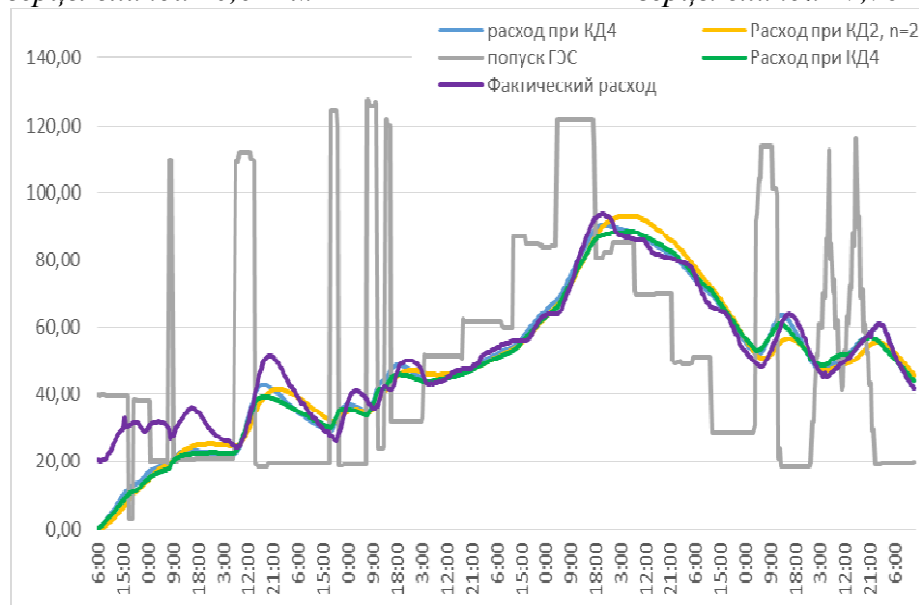


Рис. 3. Расход воды для участка реки Тверцы длиной 20,61 км

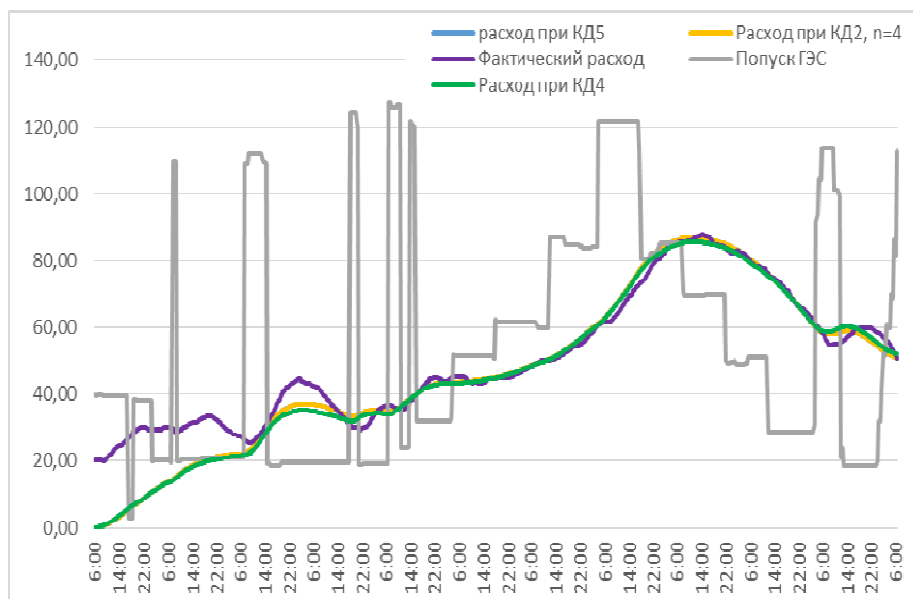


Рис. 4. Расход воды для участка реки Тверцы длиной 27,76 км

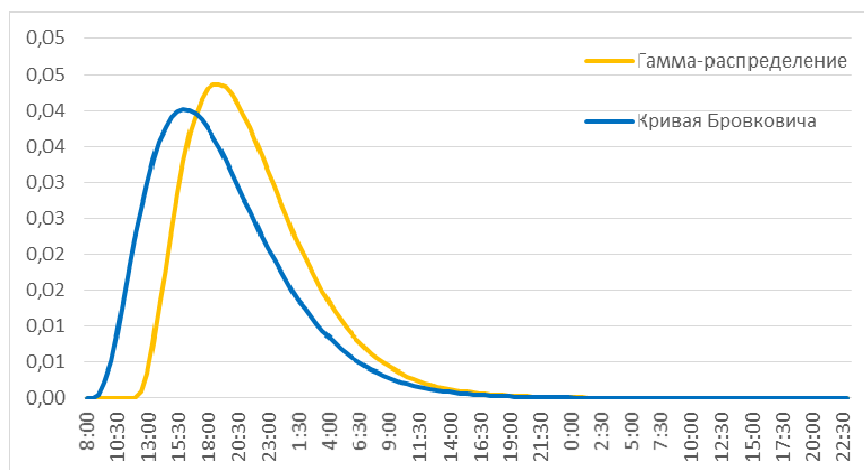


Рис. 5. Кривые добегания для участка реки Верхняя Волга длиной 24,9 км

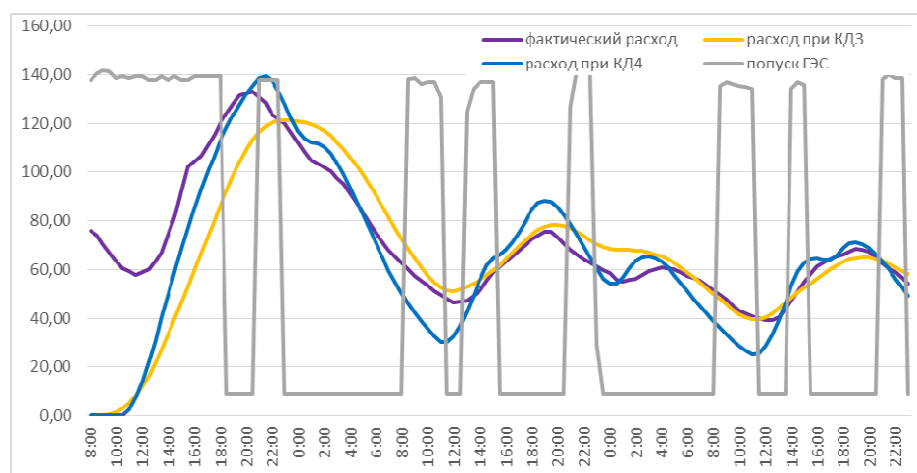


Рис. 6. Расход воды для участка реки Верхняя Волга длиной 24,9 км



### Список литературы

1. Бураков Д. А. Кривые добегаания и расчет гидрографа весеннего половодья. Томск: Томский госуниверситет, 1978. 129 с.
2. Бураков Д. А. К оценке параметров линейных моделей стока // Метеорология и гидрология. 1989. № 10. С. 89–95.
3. Исследования неустановившегося движения воды на реках Тверца и Оредеж. Л.: Гидрометеиздат, 1961.
4. Гильденблат Я. Д., Макулов В. В., Семиколонов А. С. Неустановившийся режим нижнего бьефа гидростанции // Проблемы регулирования речного стока. Вып. 2. М.: АН СССР, 1948.

УДК 510.64

## АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДОПУСТИМОСТИ ПРАВИЛ ВЫВОДА В МОДАЛЬНЫХ ЛОГИКАХ GL И ОБНОГО РАСШИРЕНИЯ K4

**А.В. Рубанова, Т.М. Мацкевич**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук, доцент В.Р. Кияткин**

*Сибирский федеральный университет*

При изучении логических систем кроме постулированных правил вывода применяются допустимые правила, относительно которых логика замкнута.

Если существует алгоритм, позволяющий по любому предъявленному правилу распознать его допустимость в изучаемой логике, то такая логика называется разрешимой по допустимости.

Настоящий доклад посвящен исследованию вопроса о разрешимости по допустимости расширений системы  $K4$  – модальной логики GL (логика доказуемости)  $GL=K4+(\Box(\Box p \rightarrow p) \rightarrow \Box p)$ .

Напомним, что правило вывода  $\frac{A_1(p_1, \dots, p_n), \dots, A_m(p_1, \dots, p_n)}{B(p_1, \dots, p_n)}$  называется допустимым в логике  $\lambda$ , если для любого набора формул  $c_1, \dots, c_n$  из того, что  $A_1(c_1, \dots, c_n) \in \lambda, \dots, A_m(c_1, \dots, c_n) \in \lambda$  следует, что  $B(c_1, \dots, c_n) \in \lambda$ .

- Модель  $K_n = (W_n, R_n, V_n)$ , где  $W_n$  – основное множество,  $R_n$  – бинарное отношение,  $V_n$  – означивание, называется  $n$ -характеристической для логики  $\lambda$ , если  $V_n$  означает  $n$  различных переменных и для любой формулы  $\alpha$  от  $n$  переменных имеет место:  $\alpha \in \lambda \Leftrightarrow K_n \models \alpha$ .
- Означивание  $S$  на шкале  $(W_n, R_n)$  модели  $K_n$  называется формульным, если для любой  $\forall p_i \in Dom(S)$  существует формула  $\alpha_i$  такая, что  $S(p_i) = V_n(\alpha_i)$ .

Пусть  $K_n, n \in \mathbb{N}$  – множество  $n$ -характеристических моделей. Правило  $\frac{A_1, \dots, A_m}{B}$  допустимо в логике  $\lambda$  тогда и только тогда, когда для  $\forall n \in \mathbb{N}$  и каждого формульного означивания  $S$  переменных из  $\Gamma$  имеет место: если  $S(A_1) = W_n, \dots, S(A_m) = W_n$ , то и  $S(B) = W_n$ .

Для того, чтобы можно было пользоваться этим критерием в логике GL, была сконструирована  $n$ -характеристическая модель  $\mathbb{M}_n^\infty$ , которая строится индукцией по  $l$ , где  $l$  – номер слоя.

### Теорема 1

1. Модель  $\mathbb{M}_n^\infty$  является  $n$ -характеристической для логики GL.
2. Каждый элемент этой модели формульный.

Построенная  $n$ -характеристическая модель используется при доказательстве другого критерия – через редуцированную форму правила.

В расширении K4 правило  $\frac{A_1, \dots, A_m}{B}$  эквивалентно  $\frac{A_1, R, \dots, A_m}{B}$ , поэтому можно рассматривать только однопосылочные правила вида  $\frac{A(p_1, \dots, p_n)}{B(p_1, \dots, p_n)}$ .

Говорят, что правило  $\Gamma$  имеет редуцированную форму, если  $\bigvee_{j=1}^n \varphi_j$ , где  $\varphi_j := \bigwedge_{0 \leq i < m} (\Diamond p)_{i,j}^{k(i,j,1)} \bigwedge_{0 \leq i < m} (\Diamond p)_{i,j}^{k(i,j,2)}$ , где  $k(i,j,1), k(i,j,2) \in \{0,1\}$  и  $(\alpha)^0 = \alpha$  и  $(\alpha)^1 = \neg \alpha$  для любой формулы  $\alpha$ ,  $p_i$  – различные переменные и все переменные правила  $r_f$  находятся среди этих  $p_i$ .

Доказано, что любое правило  $\Gamma$  может быть приведено к редуцированной форме  $r_f$ , и при этом  $\Gamma$  семантически эквивалентно  $r_f$ . Обозначим  $D(r_f) := \{\varphi_1, \dots, \varphi_n\}$  – множество всех дизъюнктов в посылке  $r_f$ . Для каждого  $\varphi_f$  зафиксируем обозначения:

$$\theta_1(\varphi_f) = \{p_i | 0 \leq i \leq m, k(i,j,1) = 0\}, \quad \theta_2(\varphi_f) = \{p_i | 0 \leq i \leq m, k(i,j,2) = 0\}.$$

Построим некоторую модель  $\mathbb{M}_X = (X, R, V)$ , где

$$\begin{aligned} X &: X \subseteq D(r_f), \\ R &: \forall \varphi_1, \varphi_k \in X \left( \varphi_1 R \varphi_k \right) \Leftrightarrow \theta_2(\varphi_k) \subset \theta_2(\varphi_1) \text{ и } \theta_1(\varphi_k) \subset \theta_2(\varphi_1), \\ V &: V(p_i) = \{\varphi_1 | p_i \in \theta_1(\varphi_1)\}. \end{aligned}$$

Доказаны следующие основные теоремы:

### Теорема 2

Если правило  $\Gamma$  в редуцированной форме не допустимо в логике GL, то найдётся подмножество  $X$  из  $D(r_f)$ , такое, что модель  $\mathbb{M} = (X, R, V)$  удовлетворяет следующим условиям:

1. В  $\mathbb{M}$  все сгустки – одноэлементны и редуцированы;
2. В  $\mathbb{M}$  имеется  $\varphi_j$  такое, что  $p_0$  не принадлежит  $\theta_1(\varphi_j)$ ;

3. Для любого  $\varphi_1 \in \mathfrak{M}$  выполняется  $\varphi_f \models_v \varphi_B$ ;
4. Для любого подмножества  $\mathcal{V}$  в модели  $\mathfrak{M}$  существует элемент  $\varphi_v$  такой, что  $\theta_2(\varphi_v) = \bigcup (\theta_2(\varphi_1) \mid \varphi_1 \in \mathcal{V}) \cup \bigcup (\theta_1(\varphi_1) \mid \varphi_1 \in \mathcal{V})$ .

### Теорема 3

Если для правила в редуцированной форме  $r_f$  существует подмножество  $X \subseteq D(r_f)$  такое, что модель  $\mathfrak{M}_X$  удовлетворяет условиям (1) – (4) из теоремы 2, то  $r_f$  не допустимо в логике GL.

Из Теоремы 2 и Теоремы 3 следует основная:

### Теорема 4

Правило в редуцированной форме допустимо в логике GL тогда и только тогда, когда для любого подмножества  $X \subseteq D(r_f)$  модель  $\mathfrak{M}_X$  не удовлетворяет условиям (1) – (4).

Поскольку правила  $r$  и  $r_f$  допустимы или недопустимы одновременно, то доказанная теорема даёт алгоритмический критерий допустимости для любого правила  $r$  в логике GL.

## 3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

УДК 532.5.013.4

### УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНОГО ТЕЧЕНИЯ С ИСПАРЕНИЕМ ОТНОСИТЕЛЬНО ДЛИННОВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

**А.В. Родионова**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук В.Б. Бекежанова**

*Сибирский федеральный университет*

Необходимость моделировать двухфазные течения с учетом испарения и точно предсказывать поведение жидкостей диктуется разработкой теплоэффективных систем охлаждения микроэлектронного оборудования, а также проведением новых экспериментов по конвекции жидкости в условиях пониженной и нормальной гравитации. Сложность изучения динамики жидких слоев, тонких пленок жидкостей и процессов теплопереноса в жидкости и попутном потоке газа состоит в том, что они сопровождаются массопереносом на границе раздела в результате испарения.

Детальное исследование двухфазных конвективных течений с учетом испарения на границе раздела и их устойчивости важны для выявления механизмов

возможных кризисных явлений, классификации характера влияния различных эффектов (термокапиллярности, гравитации, линейных размеров системы и др.) и определения возможностей управления такими течениями.

Точное решение задачи о двухслойном конвективном течении с учетом явления переноса пара через границу раздела было построено и исследовано в работе [1] (О.Н. Гончарова, Е.В. Резанова «Пример точного решения стационарной задачи о двухслойных течениях с испарением на границе раздела», Барнаул : Известия АлтГУ, 2013. № 77. С. 31–33). В качестве математической модели использовались уравнения Навье – Стокса в приближении Обербека – Буссинеска. В данной работе изучается линейная устойчивость полученного решения относительно длинноволновых возмущений.

### 1. Основное течение

Рассматривается совместное стационарное течение двух вязких несжимаемых жидкостей (жидкость и смесь газа и пара) в плоском слое с учетом силы тяжести (см. рис. 1). Верхней и нижней границами области являются твердые неподвижные стенки. На недеформируемой границе раздела сред ( $y = 0$ ) предполагается учет процесса испарения и линейная зависимость поверхностного натяжения от температуры  $\sigma = \sigma_0 + \sigma_T(T - T_0)$ , где  $T_0$  – некоторое исходное значение температуры.

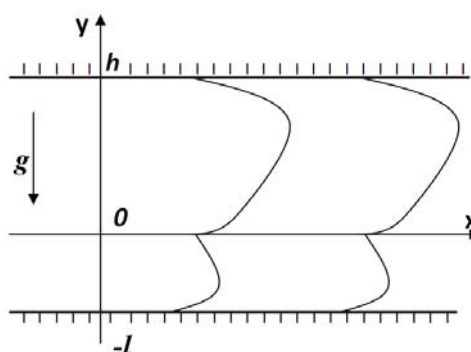


Рис. 1. Геометрия области течения

Предполагается, что течение является однонаправленным и вектор скорости имеет вид  $\mathbf{u}_i = (u_i, 0)$ . Точное решение уравнений Навье – Стокса в приближении Обербека-Буссинеска получено в работе [1]. В верхнем слое, представляющем собой смесь газа с парами жидкости, учитывается процесс диффузии и эффект Дюфура. Соответствующие поля скоростей и температур, а также поле концентрации согласно [1] имеют вид:

$$u_i = u_i(y), \quad T_i = (a_1^i + a_2^i y)x + \vartheta_i(y), \quad C_s = (b_1 + b_2 y)x + \varphi(y), \quad (1)$$

где  $i = 1$  соответствует нижний слой  $-l \leq y \leq 0$ , индексу  $i = 2$  – верхний  $0 \leq y \leq h_2$ .

## 2. Уравнения малых возмущений

При переходе к безразмерным переменным выберем в качестве характерного масштаба длины  $h_2$ , скорости  $v_2/h_2$ , давления  $\rho_2 v_2^2/h_2^2$ , температуры  $T_{20}$ . Примем в качестве единиц измерения параметров среды величины, характерные для верхнего слоя, т. е. для слоя с индексом  $i = 2$ . Таким образом, безразмерные переменные будут иметь вид:  $\eta = x/h_2, \xi = y/h_2, \tau = v_2 t/h_2^2$ . Тогда индексу  $i = 1$  соответствует область  $-h \leq \eta \leq 0$ , а  $i = 2$  – область  $0 \leq \eta \leq 1$ .

При указанном выборе единиц измерения задача характеризуется следующими безразмерными параметрами:

$$\text{Pr} = \frac{v_2}{\chi_2}, \quad \text{Gr} = \frac{g\beta_2 T_{20} h_2^3}{v_2^2}, \quad \text{Ga} = \frac{gh_2^3}{v_2^2}, \quad \text{Ma} = \frac{\sigma_T A h_2^2}{v_2^2 \rho_2}, \quad \text{Le} = \frac{D}{\chi_2}, \quad Q = \frac{A h_2}{T_{20}},$$

– числа Прандтля, Грасгофа, Галилея, Марангони, Льюиса соответственно. Знак параметра  $Q$  определяет направление градиента температуры.

Далее уже в безразмерных переменных исследуется устойчивость основного течения относительно малых возмущений скорости  $\mathbf{U}_i = (V_i, W_i)$ , температуры  $\Theta_i$ , давления  $P_i$  и концентрации  $C$ . Причем решение задачи для возмущений основного решения (1) ищется в виде нормальных плоских волн. Таким образом, новыми искомыми функциями исходной задачи теперь являются:

$$(\widehat{\mathbf{U}}, \widehat{P}, \widehat{T}, \widehat{C}) = (\mathbf{u}_i, p_i, T_i, C_s) + (\mathbf{U}_i(\xi), P_i(\xi), \Theta_i(\xi), C(\xi)) \cdot \exp[i(\alpha\eta - \lambda\tau)],$$

где  $\lambda = \lambda_r + i\lambda_i$  – комплексный декремент, определяющий временной ход возмущения,  $\alpha$  – безразмерное волновое число вдоль оси  $\eta$ .

С учетом указанного представления для амплитуд нормальных возмущений линеаризованные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} -i\lambda V_1 + i\alpha u_1 V_1 + u_1' W_1 &= -\frac{i\alpha}{\rho} P_1 + \nu(V_1'' - \alpha^2 V_1), \\ -i\lambda W_1 + i\alpha u_1 W_1 &= -\frac{1}{\rho} P_1' + \nu(W_1'' - \alpha^2 W_1) + \beta \text{Gr} \Theta_1, \\ i\alpha V_1 + W_1' &= 0, \\ -i\lambda \Theta_1 + i\alpha u_1 \Theta_1 + T_{1\eta} V_1 + T_{1\xi} W_1 &= \frac{\chi}{\text{Pr}} (\Theta_1'' - \alpha^2 \Theta_1), \end{aligned}$$

при  $-h \leq \xi \leq 0$ ;

$$\begin{aligned} -i\lambda V_2 + i\alpha u_2 V_2 + u_2' W_2 &= -i\alpha P_2 + (V_2'' - \alpha^2 V_2), \\ -i\lambda W_2 + i\alpha u_2 W_2 &= -P_2' + (W_2'' - \alpha^2 W_2) + \text{Gr} \Theta_2 + \text{Ga} \gamma C, \\ i\alpha V_2 + W_2' &= 0, \\ -i\lambda \Theta_2 + i\alpha u_2 \Theta_2 + T_{2\eta} V_2 + T_{2\xi} W_2 &= \frac{1}{\text{Pr}} (\Theta_2'' - \alpha^2 \Theta_2) + \frac{\delta}{T_{20}} (C'' - \alpha^2 C), \\ -i\lambda C + i\alpha u_2 C + V_2 C_\eta^s + W_2 C_\xi^s &= \frac{\text{Le}}{\text{Pr}} (C'' - \alpha^2 C), \end{aligned}$$

при  $0 \leq \xi \leq 1$ .

Граничные условия в линейном приближении:

$$\begin{aligned}\xi = -h: & \quad V_1 = 0, \quad W_1 = 0, \quad \Theta_1 = 0; \\ \xi = 1: & \quad V_2 = 0, \quad W_2 = 0, \quad \Theta_2 = 0, \quad C = 0 \text{ или } C' = 0; \\ \xi = 0: & \quad V_1 = V_2, \quad W_1 = W_2 = 0, \quad \Theta_1 = \Theta_2, \quad \nu\rho V_1' = V_2' + \frac{\text{Ma}}{Q} i\alpha\Theta, \\ & \quad P_1 - P_2 = 2(\nu\rho W_1' - W_2'), \quad k\Theta_1' - \Theta_2' - \frac{\delta}{T_{20}} C' = \frac{K\rho_2 D}{k_2 T_{20}} C',\end{aligned}$$

где  $K$  – теплота испарения,  $D$  – коэффициент диффузии пара в газе,  $Y$  – концентрационный коэффициент плотности, а коэффициент  $\delta$  характеризует эффект Дюфура.

Рассматриваемая краевая задача является задачей на собственные значения относительно комплексного декремента  $\lambda$ . В силу представления возмущений в виде нормальных волн, для устойчивости основного течения необходимо и достаточно, чтобы у всех собственных значений  $\lambda$  мнимая часть  $\lambda_i$  была отрицательной.

### 3. Длинноволновые возмущения

С учетом уравнения неразрывности функции  $V_i, W_i, P_i, \Theta_i, C$  и декремент  $\lambda$  представимы в следующем виде (при  $\alpha \rightarrow 0$ ):

$$\begin{aligned}V_i &= V_{i0} + \alpha V_{i1} + \dots, & W_i &= \alpha W_{i1} + \alpha^2 W_{i2} + \dots, & \lambda &= \lambda_0 + \alpha \lambda_1 + \dots, \\ \Theta_i &= \Theta_{i0} + \alpha \Theta_{i1} + \dots, & P_i &= P_{i0} + \alpha P_{i1} + \dots, & C &= C_0 + \alpha C_1 + \dots,\end{aligned}$$

После подстановки последнего разложения в систему (1), (2), задача для  $V_{i0}(\xi), W_{i1}(\xi)$  и  $\lambda_0$  отделяется и имеет вид:

$$\begin{aligned}-i\lambda_0 V_{10} &= \nu V_{10}'', & iV_{10} + W_{11}' &= 0, & -h \leq \xi \leq 0; \\ -i\lambda_0 V_{20} &= V_{20}'', & iV_{20} + W_{21}' &= 0, & 0 \leq \xi \leq 1; \\ V_{10}(-h) &= V_{20}(1) = 0, & V_{10}(0) &= V_{20}(0), & \nu\rho V_{10}'(0) &= V_{20}'(0), \\ W_{11}(-h) &= W_{21}(1) = 0, & W_{11}(0) &= W_{21}(0) = 0.\end{aligned}$$

Далее, умножая полученные уравнения на комплексно-сопряженные величины  $V_{10}^*, V_{20}^*$  и интегрируя на отрезках  $[-h; 0], [0; 1]$  соответственно, получим, что  $i\lambda_0 > 0$ , т. е. величина  $\lambda$  мнимая и  $\lambda_i < 0$  и длинноволновые возмущения затухают монотонно. На самом деле, с точностью до мультипликативной постоянной

$$\begin{aligned}V_{10}(\xi) &= \sin(\mu\xi), & V_{20}(\xi) &= \rho\sqrt{\nu} \sin(\mu\sqrt{\nu}\xi), \\ W_{11}(\xi) &= \frac{i}{\mu}(\cos(\mu\xi) - 1), & W_{21}(\xi) &= \frac{i\rho}{\mu}(\cos(\mu\sqrt{\nu}\xi) - 1),\end{aligned}$$

где  $\mu = \mu_k = 2\pi k/h$ ,  $k = 1, 2, \dots$ . Причем на физические величины  $h$  и  $\nu$  наложено ограничение  $\sqrt{\nu}/h = n/k$ , где  $n = 1, 2, \dots$ .

Таким образом, имеется счетное число значений  $\mu_k$ , и  $\lambda_0 = \lambda_{0k} = -i\nu\mu_k^2$ .

### Заключение

Методом линеаризации получены уравнения малых возмущений для течения двух жидкостей с учетом испарения на границе раздела. Найдено асимптотическое поведение комплексного декремента в длинноволновой области и доказана устойчивость решения. Получены аналитические представления нулевых приближений собственных функций в случае плоских возмущений.

# ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ В МОДЕЛИ МИКРОКОНВЕКЦИИ

**И.А. Шефер**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук В. Б. Бекежанова**

*Сибирский федеральный университет*

В последние десятилетия в связи с развитием наукоемких технологий, существенно расширился круг задач, связанных со свободноконвективными течениями. Примерами прикладных научных отраслей, в которых интенсивно развиваются и используются результаты исследований естественной конвекции, являются кристаллофизика и космические технологии. Возросшая сложность математических моделей и экспериментальных установок позволяет ставить и решать новые задачи в этих областях.

В данной работе исследуется стационарное течение вязкой теплопроводной жидкости в вертикальном канале с неподвижными твердыми стенками, на которых задан поток тепла. Изучается линейная устойчивость течения относительно малых возмущений в рамках модели микроконвекции.

## 1. Постановка задачи

Пусть жидкость заполняет плоский вертикальный канал ширины  $2a$ . Границы канала – неподвижные твердые стенки. Для описания движения жидкости воспользуемся моделью микроконвекции, предложенной В. В. Пухначевым (см. Пухначёв В. В. *Модель конвективного течения при пониженной гравитации*, Моделирование в механике, 1992, Т. 6):

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_0(1 + \beta\theta)^{-1}, \\ \operatorname{div} \mathbf{w} &= 0, \\ \mathbf{w}_t + \mathbf{w} \cdot \nabla \mathbf{w} + \beta\chi(\nabla\theta \cdot \nabla \mathbf{w} - \nabla \mathbf{w} \cdot \nabla \theta) + \beta^2\chi^2 \left( \Delta\theta \nabla\theta - \frac{\nabla|\nabla\theta|^2}{2} \right) \\ &= (1 + \beta\theta)(-\Delta q + \nu\Delta \mathbf{w}) + \mathbf{g}, \\ \theta_t + \mathbf{w} \cdot \nabla \theta + \beta\chi|\nabla\theta|^2 &= (1 + \beta\theta)\chi\Delta\theta,\end{aligned}\tag{1.1}$$

где  $\rho$  – плотность,  $q = \rho_0^{-1}(p - \lambda \operatorname{div} \mathbf{v}) - \beta(\nu - \chi)\chi\Delta\theta$  – модифицированное давление,  $\mathbf{w} = \mathbf{v} - \beta\chi\nabla\theta$  – модифицированный вектор скорости. Так как в дальнейшем рассматриваются только стационарные течения, то для замыкания уравнений зададим на границах условия для скорости и температуры в следующем виде:

$$\mathbf{w} + \beta\chi\nabla\theta = 0, \quad k \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{n}} = d,\tag{1.2}$$

где  $k$  – коэффициент температуропроводности,  $d$  – заданный поток тепла.

Известно, что плоские течения в вертикальном слое реализуются, если величина теплового потока не зависит от  $z$ , а компонента скорости  $v_3 = 0$ . В монографии [Андреев В.К., Капцов О.В., Пухначёв В.В., Родионов А.А. *Применение теоретико-групповых методов в гидродинамике*. Новосибирск: Наука, 1994] показано, что в этом случае решения системы (1.1) представимы в виде  $\mathbf{w} = (u_0, v(x), 0)$ ,  $\theta = \theta(x)$ ,  $q = (\varphi - g)y$ . В работе [Андреев В.К., Бекежанова В.Б. *Об устойчивости стационарного течения в вертикальном слое в модели микроконвекции*. Изв. РАН, МЖГ. 2004, № 2] получен точный вид решений с  $u_0 = \beta\chi d/k \equiv \text{const}$ :

$$v(x) = \frac{1}{v} \left[ (\varphi - g) \frac{x^2}{2} + c_1 x + c_2 + \frac{g\chi^2}{u_0^2} \left( 1 + \beta\bar{\theta} - \frac{u_0 x}{\chi} \right) \left( \ln \left( 1 + \beta\bar{\theta} - \frac{u_0 x}{\chi} \right) - 1 \right) \right], \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} c_1 &= -\frac{g\chi^2}{2\alpha u_0^2} \left( f_1 \ln f_1 - f_2 \ln f_2 + \frac{2u_0 a}{\chi} \right), \\ c_2 &= \frac{(g - \varphi)}{2} a^2 - \frac{g\chi^2}{u_0^2} \left( f_1 \ln f_1 + f_2 \ln f_2 - 2(1 + \beta\bar{\theta}) \right), \\ f_1 &= 1 + \beta\bar{\theta} - \frac{u_0 a}{\chi}, \quad f_2 = 1 + \beta\bar{\theta} + \frac{u_0 a}{\chi}, \\ \varphi &= g \left\{ 1 - \left[ \frac{\chi}{2u_0 a} (\ln f_2 - \ln f_1) \left( f_1 \ln f_1 + f_2 \ln f_2 + \frac{\chi}{u_0 l} (1 + \beta\bar{\theta}) (f_1 \ln f_1 + f_2 \ln f_2) \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2 \right] \cdot \left[ (1 + \beta\bar{\theta}) + (\ln f_2 - \ln f_1) \left( \frac{u_0 l}{2\chi} - \frac{\chi}{2u_0 l} (1 + \beta\bar{\theta})^2 \right) \right]^{-1} \right\}, \\ \theta(x) &= \bar{\theta} - \frac{u_0 x}{\beta\chi} = \bar{\theta} - \theta^* x, \quad \bar{\theta} = \text{const}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\theta(x) = \bar{\theta} - \frac{u_0 x}{\beta\chi} = \bar{\theta} - \theta^* x, \quad \bar{\theta} = \text{const}. \quad (1.5)$$

## 2. Безразмерные параметры. Спектральная задача

Рассмотрим возмущенное решение исходной задачи  $\tilde{\mathbf{w}} = \mathbf{w} + \mathbf{W}$ ,  $\tilde{\theta} = \theta + T$ ,  $\tilde{q} = q + Q$ . Подставив новые искомые функции  $\tilde{\mathbf{w}}$ ,  $\tilde{\theta}$ ,  $\tilde{q}$  в систему (1.1), (1.2), считая возмущения и их производные малыми, получим линеаризованную задачу:

$$\begin{aligned} \text{div} \mathbf{W} &= 0, \\ \mathbf{W}_t + \mathbf{w} \cdot \nabla \mathbf{W} + \mathbf{W} \cdot \nabla \mathbf{w} + \beta\chi(\text{rot} \mathbf{W} \times \nabla \theta + \text{rot} \mathbf{w} \times \nabla T) \\ &\quad + \beta^2 \chi^2 \text{div}(\nabla \theta \otimes \nabla T + \nabla T \otimes \nabla \theta - 2I \nabla \theta \cdot \nabla T) \\ &= (1 + \beta\theta)(-\Delta Q + \nu \Delta \mathbf{W}) + \beta T(-\Delta q + \nu \Delta \mathbf{w}), \\ T_t + \mathbf{w} \cdot \nabla T + \mathbf{W} \cdot \nabla \theta + 2\beta\chi \nabla \theta \cdot \nabla T &= (1 + \beta\theta)\chi \Delta T + \beta\chi T \Delta \theta, \\ \mathbf{W} + \beta\chi \nabla T &= 0, \quad T_x = 0, \quad |x| = a. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Введем безразмерные переменные следующим образом:

$$x' = \frac{x}{a}, \quad \mathbf{W}' = \frac{\mathbf{W}a}{\chi}, \quad T' = \frac{T}{\theta^*}, \quad Q' = \frac{Qa^2}{\nu\chi}.$$



Подставим их в задачу (2.1) и, опустив штрихи, получим:

$$\begin{aligned}
U_t + \text{Pe}U_x + vU_y - \varepsilon v_x T_y + \varepsilon^2 \theta_x (T_{xx} + T_{zz}) &= (1 + \varepsilon\theta)(-Q_x + v\Delta U)\text{Pr}, \\
V_t + \text{Pe}V_x + vV_y + v_x U + \varepsilon[\theta_x(V_x - U_y) + v_x T_x] - \varepsilon^2 \theta_x T_{xy} &= (1 + \varepsilon\theta)(-Q_y + v\Delta V)\text{Pr} + \frac{\text{Gr}T}{1 + \varepsilon\theta}, \\
W_t + \text{Pe}W_x + vW_y + \varepsilon\theta_x(W_x - U_z) - \varepsilon^2 \theta_x T_{xz} &= (1 + \varepsilon\theta)(-Q_z + v\Delta W)\text{Pr}, \\
T_t + \text{Pe}T_x + vT_y + \theta_x U + 2\varepsilon\theta_x T_x &= (1 + \varepsilon\theta)\chi\Delta T, \\
U_x + V_y + W_z &= 0, \\
W + \varepsilon\nabla T &= 0, \quad T_x = 0, \quad |x| = 1.
\end{aligned} \tag{2.2}$$

При указанном выборе безразмерных переменных задача (2.2) содержит следующие определяющие безразмерные параметры:  $\text{Pe} = \frac{u_0 a}{\chi}$ ,  $\varepsilon = \beta\theta^*$ ,  $\text{Pr} = \nu/\chi$ ,  $\text{Gr} = \beta\theta^* g a^3 / \chi^2$ .

Представим решение краевой задачи (2.2) в виде нормальных волн

$$(W, Q, T) = (W(x), Q(x), T(x)) \cdot \exp[i(\alpha_1 y + \alpha_2 z - Ct)], \tag{2.3}$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – волновые числа вдоль осей  $y$  и  $z$  соответственно,  $C$  – комплексный декремент, определяющий развитие возмущений со временем. Подставляя представление (2.3) в (2.2), получим спектральную задачу:

$$\begin{aligned}
i(\alpha_1 v - C)U + \text{Pe}U' - [i\alpha_1 \varepsilon v_x + \varepsilon^2 \theta_x (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)]T &= (1 + \varepsilon\theta)[-Q' + U'' - (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)U]\text{Pr}, \\
i(\alpha_1 v - C)V + (\text{Pe} + \varepsilon\theta_x)V' + (v_x - i\alpha_1 \varepsilon\theta_x)U - [\varepsilon v_x - i\alpha_1 \varepsilon^2 \theta_x]T' &= (1 + \varepsilon\theta)[-i\alpha_1 Q + V'' - (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)V]\text{Pr} + \frac{\text{Gr}T}{1 + \varepsilon\theta}, \\
i(\alpha_1 v - C)W + (\text{Pe} + \varepsilon\theta_x)W' - i\alpha_2 \varepsilon\theta_x U - i\alpha_2 \varepsilon^2 \theta_x T' &= (1 + \varepsilon\theta)[-i\alpha_2 Q + W'' - (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)W]\text{Pr}, \\
i(\alpha_1 v - C)T + (\text{Pe} + 2\varepsilon\theta_x)T' + \theta_x U &= (1 + \varepsilon\theta)[T'' - (\alpha_1^2 + \alpha_2^2)T], \\
U' + i\alpha_1 V + i\alpha_2 W &= 0, \\
U + \varepsilon\tilde{T}' = 0, \quad V = W = 0, \quad T' = 0, \quad |x| = 1.
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Показано, что ее можно свести к плоской задаче:

$$\begin{aligned}
i(\alpha_1 v - C)\tilde{Z} + (\text{Pe} + \varepsilon\theta_x)\tilde{Z}' + \left(v_x - \frac{i\alpha}{\lambda}\varepsilon\theta_x\right)\tilde{U} + \left[\varepsilon v_x - \frac{i\alpha}{\lambda}\varepsilon^2 \theta_x\right]\tilde{T}' &= (1 + \varepsilon\theta)\left[-\frac{i\alpha}{\lambda}Q + \tilde{Z}'' - \alpha^2 \tilde{Z}\right]\text{Pr} + \frac{\text{Gr}T}{1 + \varepsilon\theta}, \\
i(\alpha_1 v - C)\tilde{U} + \text{Pe}\tilde{U}' - [i\alpha_1 \varepsilon v_x + \varepsilon^2 \theta_x \alpha^2]\tilde{T} &= (1 + \varepsilon\theta)[- \tilde{Q}' + \tilde{U}'' - \alpha^2 \tilde{U}]\text{Pr}, \\
i(\alpha_1 v - C)\tilde{T} + (\text{Pe} + 2\varepsilon\theta_x)\tilde{T}' + \theta_x \tilde{U} &= (1 + \varepsilon\theta)[\tilde{T}'' - \alpha^2 \tilde{T}],
\end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned}\tilde{U}' + i\alpha_1\tilde{Z} &= 0, \\ \tilde{U} + \varepsilon\tilde{T}' &= 0, \quad \tilde{Z} = 0, \quad \tilde{T}' = 0, \quad |x| = 1,\end{aligned}$$

где  $\lambda = \alpha_1/\alpha$ ,  $\alpha = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}$ .

### 3. Численное решение

Будем рассматривать плоские возмущения (в задаче (2.5) следует положить  $\lambda = 1$ ,  $\alpha = \alpha_1$ ). Численный анализ устойчивости модельной среды  $SiO_3$  для разных значений теплового потока на границе (5, 10, 100, 200 Вт) проводился с использованием метода ортогонализации (см. Годунов С. К. О численном решении краевых задач для систем линейных ОДУ. Успехи мат. наук, 1961. Т. 6. Вып. 3) для решения краевой задачи и метода секущих для поиска декрементов. Код реализован в среде MATLAB. Расчеты проводились в диапазоне волновых чисел  $0,1 < \alpha_1 \leq 10$ . Полученные численные результаты говорят о том, что возмущения являются затухающими. Следовательно течение, которое описывается решением (3), устойчиво.

УДК 539.3 (075.8)

## ТРЕХМЕРНАЯ КВАЗИСТАТИСТИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ПОЛОГО БЕСКОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА В НАПРЯЖЕНИЯХ

**К.Ю. Атургашева**

**Научный руководитель канд. техн. наук П.И. Анферов**

*Сибирский федеральный университет*

Рассмотрим задачу термоупругости для цилиндра ( $a \leq r \leq b$ ,  $-\pi \leq \theta \leq \pi$ ,  $-\infty < z < \infty$ ), который первоначально находится при постоянной нулевой температуре, а затем вследствие внешнего теплового воздействия его температура становится равной  $T$ . Внутренняя и внешняя поверхности цилиндра предполагаются свободными от внешних усилий.

При расчетах динамические эффекты не учитываются. В этом случае напряжения зависят от времени неявно, как от параметра, через температуру, которая предполагается известной. Теплофизические и механические свойства материала цилиндра полагаются не зависящими от температуры. Запишем исходные соотношения для решения поставленной задачи.

Уравнения равновесия:

$$\sigma_{rr,r} + r^{-1}\sigma_{r\theta,\theta} + \sigma_{rz,z} + r^{-1}(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) = 0, \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta r,r} + r^{-1}\sigma_{\theta\theta,\theta} + \sigma_{\theta z,z} + 2r^{-1}\sigma_{\theta r} = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_{zr,r} + r^{-1}\sigma_{z\theta,\theta} + \sigma_{zz,z} + r^{-1}\sigma_{zr} = 0. \quad (3)$$

Условия совместности деформаций:

$$\nabla^2(\sigma_{rr} + \beta T) - 4r^{-2}\sigma_{r\theta,\theta} - 2r^{-2}(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) = -(2f - \beta T)_{,rr}, \quad (4)$$

$$\nabla^2(\sigma_{\theta\theta} + \beta T) + 4r^{-2}\sigma_{r\theta,\theta} + 2r^{-2}(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) = -r^{-1}(2f - \beta T)_{,r} - r^{-2}(2f - \beta T)_{,\theta\theta}, \quad (5)$$

$$\nabla^2\sigma_{r\theta} + 2r^{-2}(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})_{,\theta} - 4r^{-2}\sigma_{r\theta} = -[r^{-1}(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})_{,\theta}]_{,r}, \quad (6)$$

$$\nabla^2\sigma_{\theta z} + 2r^{-2}\sigma_{rz,\theta} - r^{-2}\sigma_{\theta z} = -r^{-1}(2f - \beta T)_{,\theta z}, \quad (7)$$

$$\nabla^2\sigma_{rz} - 2r^{-2}\sigma_{\theta z,\theta} - r^{-2}\sigma_{rz} = -(2f - \beta T)_{,rz}, \quad (8)$$

$$\nabla^2 f = 0, \quad (9)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Запятая на уровне индексов означает частное дифференцирование по координатам, указанным после нее.

Гармоническая функция  $f$  связана с диагональными компонентами тензора напряжений, температурой  $T$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$  равенством:

$$f = (\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz} + 2\beta T) / [2(1 + \mu)].$$

Константа  $\beta$  выражается через коэффициент термического расширения  $\alpha$  и модуль Юнга  $E$  формулой  $\beta = \alpha E / (1 - \mu)$ .

Граничные условия для уравнений (4) – (8) таковы:

$$\sigma_{rr}(a, \theta, z) = \sigma_{r\theta}(a, \theta, z) = \sigma_{rz}(a, \theta, z) = 0, \quad (10)$$

$$\sigma_{rr}(b, \theta, z) = \sigma_{r\theta}(b, \theta, z) = \sigma_{rz}(b, \theta, z) = 0. \quad (11)$$

Искомые функции  $\sigma_{jk}$  и  $f$  ищем, разлагая их в ряды Фурье по координате  $\theta$  и интегралы Фурье по координате  $z$ :

$$\sigma_{jk}(r, \theta, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\sigma}_{jk}(r, n, \omega) e^{i(n\theta + \omega z)} d\omega. \quad (12)$$

Здесь чертой сверху обозначено двойное преобразование Фурье

$$\overline{\sigma}_{jk}(r, n, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_{jk}(r, \theta, z) e^{-i(n\theta + \omega z)} dz d\theta. \quad (13)$$

Применим интегральное преобразование (13) ко всем членам уравнений (4) – (9), получим с учетом правила преобразования Фурье производных систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\bar{\nabla}(\overline{\sigma_{rr}} + \beta T) - 4r^{-2}in\overline{\sigma_{r\theta}} - 2r^{-2}(\overline{\sigma_{rr}} - \overline{\sigma_{\theta\theta}}) = -(2\bar{f} - \beta\bar{T})_{,rr}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{\nabla}(\overline{\sigma_{\theta\theta}} + \beta T) + 4r^{-2}in\overline{\sigma_{r\theta}} + 2r^{-2}(\overline{\sigma_{rr}} - \overline{\sigma_{\theta\theta}}) = \\ = -r^{-1}(2\bar{f} - \beta\bar{T})_{,r} + n^2r^{-2}(2\bar{f} - \beta\bar{T}), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\bar{\nabla}\overline{\sigma_{r\theta}} + 2r^{-2}in(\overline{\sigma_{rr}} - \overline{\sigma_{\theta\theta}}) - 4r^{-2}\overline{\sigma_{r\theta}} = -[inr^{-1}(2\bar{f} - \beta\bar{T})]_{,r}, \quad (16)$$

$$\bar{\nabla}\overline{\sigma_{\theta z}} + 2inr^{-2}\overline{\sigma_{rz}} - r^{-2}\overline{\sigma_{\theta z}} = n\omega r^{-1}(2\bar{f} - \beta\bar{T}), \quad (17)$$

$$\bar{\nabla}\bar{\sigma}_{rz} - 2inr^{-2}\bar{\sigma}_{\theta z} - r^{-2}\bar{\sigma}_{rz} = -i\omega(2\bar{f} - \beta\bar{T})_{,r}, \quad (18)$$

$$\frac{d^2\bar{f}}{dr^2} + r^{-1}\frac{d\bar{f}}{dr} - \left(\frac{n^2}{r^2} + \omega^2\right)\bar{f} = 0. \quad (19)$$

Граничные условия для (14) – (19) следуют из (10), (11)

$$\bar{\sigma}_{rr}(a, n, \omega) \pm i\bar{\sigma}_{r\theta}(a, n, \omega) = \bar{\sigma}_{rz}(a, n, \omega) = 0, \quad (20)$$

$$\bar{\sigma}_{rr}(b, n, \omega) \pm i\bar{\sigma}_{r\theta}(b, n, \omega) = \bar{\sigma}_{rz}(b, n, \omega) = 0. \quad (21)$$

Здесь обозначено

$$\bar{\nabla} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} - \left(\frac{n^2}{r^2} + \omega^2\right).$$

Введем в рассмотрение новые неизвестные функции:  $\sigma_k, k = 1, 2, \dots, 5$  соотношениями:

$$\sigma_1 = \bar{\sigma}_{rr} + \bar{\sigma}_{\theta\theta} + \beta\bar{T}, \quad \sigma_2 = \bar{\sigma}_{rr} - \bar{\sigma}_{\theta\theta} + 2i\bar{\sigma}_{r\theta} - \beta\bar{T}, \quad (22)$$

$$\sigma_3 = \bar{\sigma}_{rr} - \bar{\sigma}_{\theta\theta} - 2i\bar{\sigma}_{r\theta} - \beta\bar{T}, \quad \sigma_4 = \bar{\sigma}_{\theta z} + i\bar{\sigma}_{rz}, \quad \sigma_5 = \bar{\sigma}_{\theta z} - i\bar{\sigma}_{rz}, \quad (23)$$

через которые искомые преобразования Фурье  $\bar{\sigma}_{jk}(r, n, \omega)$  выражаются формулами:

$$\bar{\sigma}_{rr} = (2\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/4, \quad \bar{\sigma}_{\theta\theta} = (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 - 4\beta\bar{T})/4, \quad (24)$$

$$\bar{\sigma}_{r\theta} = (\sigma_2 - \sigma_3)/4i, \quad \bar{\sigma}_{rz} = (\sigma_4 - \sigma_5)/2i, \quad (25)$$

$$\bar{\sigma}_{zz} = 2(\mu + 1)\bar{f} - \sigma_1 - \beta\bar{T}, \quad \bar{\sigma}_{\theta z} = (\sigma_4 + \sigma_5)/2, \quad (26)$$

$$\bar{\sigma}_{rr} - \bar{\sigma}_{\theta\theta} = [(\sigma_2 + \sigma_3) + \beta\bar{T}]/2. \quad (27)$$

От уравнений (1)–(3) перейдем к равенствам для трансформант Фурье и введем в них новую независимую переменную  $\rho = \omega r$ . Перепишем их в виде:

$$\rho\bar{\sigma}'_{rr} + (\bar{\sigma}_{rr} - \bar{\sigma}_{\theta\theta}) + i\rho\bar{\sigma}_{rz} + in\bar{\sigma}_{r\theta} = 0, \quad (28)$$

$$i\rho\bar{\sigma}'_{zz} + \rho\bar{\sigma}'_{rz} + \bar{\sigma}_{rz} + in\bar{\sigma}_{\theta z} = 0, \quad (29)$$

$$\rho\bar{\sigma}'_{r\theta} + i\rho\bar{\sigma}_{\theta z} + 2\bar{\sigma}_{r\theta} + in\bar{\sigma}_{\theta\theta} = 0. \quad (30)$$

Здесь и далее штрихи над символами означают дифференцирование по  $\rho$ .

Комбинируя уравнения (14)–(18) в соответствии с определениями (25)–(26) и переходя к переменной  $\rho$ , запишем дифференциальные уравнения для функций  $\sigma_k(\rho)$ ,  $k = 1, 2, \dots, 5$ :

$$\sigma_1'' + \rho^{-1}\sigma_1' - [1 + \rho^{-2}n^2]\sigma_1 = -2\bar{f} + \beta\bar{T}, \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \sigma_2'' + \rho^{-1}\sigma_2' - [1 + \rho^{-2}(n+2)^2]\sigma_2 = \\ = 2[2(n+1)\rho^{-1}(\bar{f}' - n\bar{f}\rho^{-1}) - \bar{f}] - 2(n+1)\beta\rho^{-1}[\bar{T}' - (n+2)\bar{T}\rho^{-1}] + \beta\bar{T}, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \sigma_3'' + \rho^{-1}\sigma_3' - [1 + \rho^{-2}(n-2)^2]\sigma_3 = \\ = -2[2(n-1)\rho^{-1}(\bar{f}' + n\bar{f}\rho^{-1}) + \bar{f}] + 2(n-1)\beta\rho^{-1}[\bar{T}' + (n-2)\bar{T}\rho^{-1}] + \beta\bar{T}, \end{aligned} \quad (33)$$

$$\sigma_4'' + \rho^{-1}\sigma_4' - [1 + \rho^{-2}(n-1)^2]\sigma_4 = 2(\bar{f}' + n\bar{f}\rho^{-1}) - n\rho^{-1}\beta\bar{T} - \beta\bar{T}', \quad (34)$$

$$\sigma_5'' + \rho^{-1}\sigma_5' - [1 + \rho^{-2}(n+1)^2]\sigma_5 = -2(\bar{f}' - n\bar{f}\rho^{-1}) - n\rho^{-1}\beta\bar{T} + \beta\bar{T}'. \quad (35)$$

Из (19) следует, что

$$\bar{f}(\rho) = AI_n(\rho) + BK_n(\rho), \quad (36)$$

где  $A, B$  – константы,  $I_n, K_n$  – модифицированные функции Бесселя.

Подставим (36) в уравнения (31)–(35) и, преобразуя выражения, содержащие  $\bar{f}$ , перепишем их в виде:

$$\bar{\sigma}_1'' + \rho^{-1}\bar{\sigma}_1' - [1 + \rho^{-2}n^2]\bar{\sigma}_1 = -2(AI_n + BK_n) + \beta\bar{T}, \quad (37)$$

$$\sigma_2'' + \rho^{-1}\sigma_2' - [1 + \rho^{-2}(n+2)^2]\sigma_2 = \quad (38)$$

$$= -2(AI_{n+2} + BK_{n+2}) - 2(n+1)\beta\rho^{-1}[\bar{T}' - (n+2)\bar{T}\rho^{-1}] + \beta\bar{T},$$

$$\sigma_3'' + \rho^{-1}\sigma_3' - [1 + \rho^{-2}(n-2)^2]\sigma_3 = \quad (39)$$

$$= -2(AI_{n-2} + BK_{n-2}) + 2(n-1)\beta\rho^{-1}[\bar{T}' + (n-2)\bar{T}\rho^{-1}] + \beta\bar{T},$$

$$\sigma_4'' + \rho^{-1}\sigma_4' - [1 + \rho^{-2}(n-1)^2]\sigma_4 = -2(AI_{n-1} - BK_{n-1}) - n\rho^{-1}\beta\bar{T} - \beta\bar{T}', \quad (40)$$

$$\sigma_5'' + \rho^{-1}\sigma_5' - [1 + \rho^{-2}(n+1)^2]\sigma_5 = -2(AI_{n+1} - BK_{n+1}) - n\rho^{-1}\beta\bar{T} + \beta\bar{T}'. \quad (41)$$

Граничные условия для уравнений (37)–(41) следуют из (20), (21) и определений (22), (23):

$$\bar{\sigma}_1(a\omega) + \bar{\sigma}_2(a\omega) = \bar{\sigma}_1(a\omega) + \bar{\sigma}_3(a\omega) = \bar{\sigma}_4(a\omega) - \bar{\sigma}_5(a\omega) = 0, \quad (42)$$

$$\bar{\sigma}_1(b\omega) + \bar{\sigma}_2(b\omega) = \bar{\sigma}_1(b\omega) + \bar{\sigma}_3(b\omega) = \bar{\sigma}_4(b\omega) - \bar{\sigma}_5(b\omega) = 0. \quad (43)$$

Функции  $\bar{f}, \sigma_k(\rho), k = 1, \dots, 5$  должны тождественно удовлетворять уравнениям (28)–(30), если в них  $\bar{\sigma}_{jk}$  выразить через  $\sigma_k$  по формулам (24)–(27).

Общие решения уравнений (31) – (35) представим в виде

$$\sigma_k(\rho) = \tau_k(\rho) + s_k(\rho), \quad k = 1, \dots, 5 \quad (44)$$

Здесь функции  $\tau_k(\rho)$  являются общими решениями уравнений (31)–(35) при  $\bar{T}(\rho)$  равной нулю.

Эти функции равны:

$$\tau_1 = A_1I_n + B_1K_n - \rho(AI_{n-1} - BK_{n-1}), \quad (45)$$

$$\tau_2 = A_2I_{n+2} + B_2K_{n+2} - \rho(AI_{n+1} - BK_{n+1}), \quad (46)$$

$$\tau_3 = A_3I_{n-2} + B_3K_{n-2} - \rho(AI_{n-1} - BK_{n-1}), \quad (47)$$

$$\tau_4 = A_4I_{n-1} + B_4K_{n-1} + \rho(AI_n + BK_n), \quad (48)$$

$$\tau_5 = A_5I_{n+1} + B_5K_{n+1} - \rho(AI_n + BK_n). \quad (49)$$

Функции  $s_k(\rho)$  – это частные решения уравнений (31)–(35) при  $A = 0, B = 0$ .

Учитывая, что вронскиан функций  $I_n(\rho), K_n(\rho)$  равен  $-1/\rho$ , методом вариации произвольных постоянных для  $s_k(\rho)$  получаем:

$$s_1(\rho) = P_1(\rho)I_n(\rho) - Q_1(\rho)K_n(\rho), \quad (50)$$

$$s_2(\rho) = P_1(\rho)I_{n+2}(\rho) - Q_1(\rho)K_{n+2}(\rho), \quad (51)$$

$$s_3(\rho) = P_1(\rho)I_{n-2}(\rho) - Q_1(\rho)K_{n-2}(\rho), \quad (52)$$

$$s_4(\rho) = -P_1(\rho)I_{n-1}(\rho) - Q_1(\rho)K_{n-1}(\rho), \quad (53)$$

$$s_5(\rho) = P_1(\rho)I_{n+1}(\rho) + Q_1(\rho)K_{n+1}(\rho), \quad (54)$$

где

$$P_1(\rho) = \beta \int \rho \bar{T} K_n(\rho) d\rho, \quad Q_1(\rho) = \beta \int \rho \bar{T} I_n(\rho) d\rho. \quad (55)$$

В уравнениях (28)–(30) выразим  $\bar{\sigma}_{jk}(\rho)$  по формулам (24)–(27), а  $\sigma_k$  выразим из равенства (44). Получим следующие уравнения:

$$2\rho\tau'_1 + [\rho\tau'_2 + (n+2)\tau_2] + [\rho\tau'_3 - (n-2)\tau_3] + 2\rho\tau_4 - 2\rho\tau_5 + U(\rho) = 0, \quad (56)$$

$$2\rho\tau_1 - 4\rho(\mu+1)\bar{f} + [\rho\tau'_4 - (n-1)\tau_4] - [\rho\tau'_5 + (n+1)\tau_5] + V(\rho) = 0, \quad (57)$$

$$-2n\tau_1 + [\rho\tau'_2 + (n+2)\tau_2] - [\rho\tau'_3 - (n-2)\tau_3] - 2\rho\tau_4 - 2\rho\tau_5 + W(\rho) = 0. \quad (58)$$

Функции  $U(\rho), V(\rho), W(\rho)$  задаются равенствами:

$$U(\rho) = 2\rho s'_1 + [\rho s'_2 + (n+2)s_2] + [\rho s'_3 - (n-2)s_3] + 2\rho s_4 - 2\rho s_5 + 4\beta\bar{T}, \quad (59)$$

$$V(\rho) = 2\rho s_1 + [\rho s'_4 - (n-1)s_4] - [\rho s'_5 + (n+1)s_5] + 2\rho\beta\bar{T}, \quad (60)$$

$$W(\rho) = -2ns_1 + [\rho s'_2 + (n+2)s_2] - [\rho s'_3 - (n-2)s_3] - 2\rho s_4 - 2\rho s_5 + 4n\beta\bar{T}. \quad (61)$$

Если в выражения (59)–(61) подставить  $\bar{s}_k(\rho)$  из (50)–(54), то после преобразований получаем:

$$U(\rho) \equiv 0, \quad V(\rho) \equiv 0, \quad W(\rho) \equiv 0. \quad (62)$$

Подставляя в (56)–(58) выражения для  $\tau_k(\rho)$  из формул (45)–(49), получим три тождества:

$$I_{n+1}(A_2 - 2A - 2A_5 + A_1) - K_{n+1}(B_2 - 2B + 2B_5 + B_1) \equiv 0, \quad (63)$$

$$I_{n-1}(2A(n-3) + A_3 + 2A_4 + A_1) + K_{n-1}(-2B(n-3) - B_3 + 2B_4 - B_1) \equiv 0, \quad (64)$$

$$I_n(-4\mu A - 2nA + A_4 - A_5 + 2A_1) + K_n(-4\mu B - 2nB - B_4 + B_5 + 2B_1) \equiv 0. \quad (65)$$

Так как  $I_n(\rho), K_n(\rho)$  — линейно независимые функции, то все выражения в круглых скобках в (63)–(65) должны равняться нулю. Это будет выполнено, если константы связаны равенствами:

$$A_2 = 2A + 2A_5 - A_1, \quad (66)$$

$$A_3 = 3A_1 - 2A_5 - [8\mu + 6(n-1)]A, \quad (67)$$

$$A_4 = 2A(2\mu + n) + A_5 - 2A_1, \quad (68)$$

$$B_2 = 2B - 2B_5 - B_1, \quad (69)$$

$$B_3 = 3B_1 + 2B_5 - [8\mu + 6(n-1)]B, \quad (70)$$

$$B_4 = -2B(2\mu + n) + B_5 + 2B_1. \quad (71)$$

Чтобы найти остальные константы, фигурирующие в формулах (45)–(49), подчиним функции  $\sigma_k(\rho)$  граничным условиям (42), (43), получим шесть равенств:

$$\tau_1(a\omega) + \tau_2(a\omega) = -s_1(a\omega) - s_2(a\omega), \quad (72)$$

$$\tau_2(a\omega) + \tau_3(a\omega) = -s_1(a\omega) - s_3(a\omega), \quad (73)$$

$$\tau_4(a\omega) - \tau_5(a\omega) = -s_4(a\omega) + s_5(a\omega), \quad (74)$$

$$\tau_1(b\omega) + \tau_2(b\omega) = -s_1(b\omega) - s_2(b\omega), \quad (75)$$

$$\tau_2(b\omega) + \tau_3(b\omega) = -s_1(b\omega) - s_3(b\omega), \quad (76)$$

$$\tau_4(b\omega) - \tau_5(b\omega) = -s_4(b\omega) + s_5(b\omega). \quad (77)$$

Подставляя  $\tau_k(\rho)$  из (45)–(49) в (72)–(77) и учитывая равенства (66)–(71), получим систему алгебраических уравнений:

$$A\varphi_1(a\omega) + B\varphi_2(a\omega) + A_1\varphi_3(a\omega) + B_1\varphi_4(a\omega) + 2A_5I_{n+2}(a\omega) - 2B_5K_{n+2}(a\omega) = -s_1(a\omega) - s_2(a\omega), \quad (78)$$

$$A\psi_1(a\omega) + B\psi_2(a\omega) + A_1\psi_3(a\omega) + B_1\psi_4(a\omega) - 2A_5I_{n-2}(a\omega) + 2B_5K_{n-2}(a\omega) = -s_2(a\omega) + s_3(a\omega), \quad (79)$$

$$A\chi_1(a\omega) + B\chi_2(a\omega) - 2A_1I_{n-1}(a\omega) + 2B_1K_{n-1}(a\omega) + A_52n\rho^{-1}I_n(a\omega) - B_52n\rho^{-1}K_n(a\omega) = -s_4(a\omega) + s_5(a\omega), \quad (80)$$

$$A\varphi_1(b\omega) + B\varphi_2(b\omega) + A_1\varphi_3(b\omega) + B_1\varphi_4(b\omega) + 2A_5I_{n+2}(b\omega) - 2B_5K_{n+2}(b\omega) = -s_1(b\omega) - s_2(b\omega), \quad (81)$$

$$A\psi_1(b\omega) + B\psi_2(b\omega) + A_1\psi_3(b\omega) + B_1\psi_4(b\omega) - 2A_5I_{n-2}(b\omega) + 2B_5K_{n-2}(b\omega) = -s_2(b\omega) + s_3(b\omega), \quad (82)$$

$$A\chi_1(b\omega) + B\chi_2(b\omega) - 2A_1I_{n-1}(b\omega) + 2B_1K_{n-1}(b\omega) + A_52n\rho^{-1}I_n(b\omega) - B_52n\rho^{-1}K_n(b\omega) = -s_4(b\omega) + s_5(b\omega). \quad (83)$$

Здесь  $\varphi_k(x), \psi_k(x)$  и  $\chi_k(x)$  известные комбинации модифицированных функций Бесселя.

Решив систему уравнений (78)–(83), определим константы:  $A, B, A_1, B_1, A_5, B_5$ . Вычисленные константы подставим в (45)–(49), а затем найдем  $\sigma_k(\rho)$  по (44), через которое выражаем трансформанты Фурье-напряжений по формулам (24)–(26). Затем производим обратные преобразования Фурье (12) и определяем напряженное состояние цилиндра.

#### **4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 519.688

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ДВИЖУЩИХСЯ ВИЗУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Р.П. Магденко**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук Д.А. Цыганок**

*Сибирский федеральный университет*

В связи с увеличением потока транспортных средств на улицах Красноярска, проблема определения загруженности дорог становится все более актуальной. Особенно остро она ощущается в мегаполисах. Сейчас в России основным источником информации о загруженности дорог являются системы, которые отображают текущую дорожную обстановку. Одна из них – это «Система контроля дорожного движения» от компании «Интегра-С». Она предназначена для информационно-технологического и аналитического обеспечения процесса контроля движения автотранспорта на перекрестках, регулируемых пешеходных переходах и автотрассах, оперативного анализа дорожной ситуации и доведения требуемой информации до пользователей, обладающих правом доступа. Есть еще проект – «Трафик-Инспектор» от компании «Интеллектуальные системы безопасности», который позволяет определить количество проехавших автомобилей, среднюю скорость потока, загруженность полосы движения, среднюю дистанцию между автомобилями, интервал времени между проездом автомобилей, количество легковых и грузовых автомобилей. Существуют еще несколько программ, которые определяют те или иные параметры потока движущихся визуальных объектов, но у всех есть недостатки: нужно специальное оборудование или большая стоимость продукта. Поэтому данная задача остается актуальной. Целью данного проекта является разработка программного обеспечения, которое будет определять загруженность дорог Красноярска, анализируя видеопоток информации с обычных камер города.

Вначале предстояло определить – на каком языке писать (*Java*, *C#*, *C++* и т. п.), какие библиотеки использовать и многое другое. Так как информация с камер города будет подаваться и обрабатываться в режиме реального времени, то важным критерием выбора языка стала скорость обработки данных. Поэтому был выбран *C++*. Для работы с видео была использована *OpenCV* – библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом, написанная на *C++*. Также, чтобы данной программой могли воспользоваться люди, пользующиеся разными операционными системами, была взята библиотека *Qt*, которая позволяет запускать написанное с ее помощью программное обеспечение в большинстве современных операционных систем путем простой компиляции программы для каждой ОС без изменения исходного кода.



Сейчас уже реализован простой интерфейс и два режима программы: ручной и автоматический. Сейчас программа работает только с видеофайлами. Ручной режим позволяет определить среднюю скорость движения выбранных машин. Происходит это следующим образом. На видео отмечены две линии (линии управления), обозначающие начало и конец участка дороги, в пределах которого происходит определение времени, его прохождения конкретной машиной. Слежение за автомобилем происходит с помощью интерактивного метода Лукаса – Канаде. То есть, как только машина проехала первую линию, запускается таймер, а при пересечении со второй – останавливается. Теперь, зная время и расстояние между линиями, не сложно получить и скорость автомобиля. Данный алгоритм был протестирован на одной из камер города и показал хорошие результаты. Примерно в 95 % случаях скорость транспорта определялась корректно. Но у него есть один недостаток – линии управления. В данной реализации их устанавливает пользователь. Автоматическое определение местоположение линий управлений является далеко не простой задачей. Отсюда следует, что для корректной работы нужно их правильно настроить перед запуском программы. Автоматический режим, который позволяет в некоторой области искать движущиеся объекты, а затем с помощью вспомогательных линий определять их скорость. Исходя из результатов проведённых тестов данный алгоритм для этого режима показывает не очень хорошие результаты и нуждается в доработке.



В программе реализованы два главных модуля: *mainwindow* и *engine*. Первый осуществляет взаимодействие пользователя с программой (выбор видео, определение интересующих машин для ручного режима, показ средней скорости и т.д.). Во втором реализована вся основная работа с видео и интеграция *OpenCV* в *Qt* (применение алгоритмов из *OpenCV* и визуализация кадров средствами *Qt*). Для анализа видео используются две основные функции. Первая определяет движущиеся объекты в некоторой заданной области, а вторая помогает сопровождать выбранные автомобили от одного кадра к другому

Таким образом, сейчас уже реализованы ручной и автоматический режимы. Стоит отметить хорошие результаты первого из них. В дальнейшем планируется получать видеопоток напрямую из Интернета, улучшить автоматический режим и программное определение местоположений линий управления.

УДК 004.9

## **РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО КУРСУ ИНФОРМАТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ НЕМАТЕМАТИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

**А.В. Огородникова**

**Научный руководитель ст. преподаватель М.М. Клунникова**

*Сибирский федеральный университет*

В современном мире большинство информации, доступной человеку, хранится в цифровом формате. Для современного поколения становится обыденным использование различных технических новинок, поиск информации в Интернете, использование социальных сетей, путешествие в виртуальные миры, постоянное нахождение в режиме *on-line*. Одна из основательниц электронных курсов *Coursera*, лучшего, по версии журнала *Time*, образовательного сайта 2012 года, профессор компьютерных наук Дафни Коллер отметила, что «сейчас подрастает поколение, которое в процессе учебы активно использует технологии и социальное взаимодействие. Это естественно для них».

Существующие реалии требуют серьезных изменений в подходе к обучению, в том числе и обучению информационным технологиям. Целью любого учебного курса по изучению информатики является обучение студентов владению современными компьютерными технологиями, техническими средствами и программным обеспечением, необходимым для жизни и деятельности в информационном обществе. В рамках обучения студент должен получить общий объем знаний по информатике, целостное представление об основных этапах становления современной информатики и ее структуре, об основных понятиях и методах, о роли и месте информатики в различных сферах человеческой деятельности, что даст

ему возможность применения полученных компетенций в дальнейшей практической деятельности по специальности.

Для всех учебных заведений вопрос создания качественных электронных учебных материалов, которые можно эффективно использовать как при заочном (или дистанционном), так и при очном обучении на сегодняшний день стоит особенно актуально. Электронные структурированные материалы облегчают понимание и запоминание учебной программы, дают большие возможности для самостоятельной проверки знаний на всех этапах работы, предоставляя дополнительные разъяснения, повторения и подсказки, позволяют графически более наглядно интерпретировать различные процессы, высвобождают время для глубокого анализа изучаемой темы.

В рамках бакалаврской работы создан электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) для дисциплины «Информатика и базы данных» для направления 031900.62 «Международные отношения».

Был проведен анализ подходов к созданию электронных учебников, рассмотрены этапы разработки, требования, технологии разработки ЭУМК, выполнен сравнительный анализ инструментальных сред для создания электронных учебных материалов. На основе этого анализа была выбрана подходящая для разработки ЭУМК среда – Moodle и рассмотрены ее особенности более подробно.

Инструментальная среда СДО Moodle (Modular Object – Oriented Dynamic Learning Environment) является свободно распространяемой системой управления обучением, которая ориентирована, прежде всего, на организацию взаимодействия между преподавателем и учениками и подходит как для организации традиционных дистанционных курсов, так и для поддержки очного обучения. Для использования *Moodle* достаточно иметь любой *web*-браузер, имеется поддержка 61 различных языков и мобильной версии, обеспечивающей доступ через мобильный телефон. Система используется в более чем 200 стран мира.

Данный продукт содержит множество методических приемов и форм учебного взаимодействия, таких как глоссарий, лекция, опрос, пакет *SCORM*, семинар, тест, чат, форум. Система поддерживает личный кабинет учащегося, где можно отследить успеваемость студента и его активность при изучении курса. В системе имеется поддержка обмена файлами любых форматов и размеров между всеми участниками процесса обучения.

Для лучшего представления материала лекции строятся по принципу чередования страниц с теоретическим материалом и страниц с обучающими тестовыми заданиями и вопросами. Для повышения интерактивности лекций существует возможность использования презентаций, изображений, *Flash*-роликов.

Система тестирования поддерживает тестовые вопросы стандартных типов: с несколькими вариантами ответов, с выбором «верно» / «не верно», короткий текстовый ответ, на соответствие, эссе и др. Тесты могут быть обучающими (показывать правильные ответы) или контрольными (сообщать только оценку). В *Moodle* существует встроенная возможность статистического анализа тестов. Обработка результатов испытаний, необходимая для получения характеристик качества тестовых заданий, состоит в следующем.

В соответствии с педагогической теорией измерений полученные испытуемыми результаты испытаний представляются в виде матрицы следующего вида (рис. 1).

Задания ( $j = 1, 2, \dots, K$ )	Испытуемые ( $i = 1, 2, \dots, N$ )					$p_j = \sum x_{ij}$
	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1N-1}$	$x_{1N}$	$p_1$
	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2N-1}$	$x_{2N}$	$p_2$
	...	...	...	...	...	...
	$x_{K-11}$	$x_{K-12}$	...	$x_{K-1N-1}$	$x_{K-1N}$	$p_{K-1}$
	$x_{K1}$	$x_{K2}$	...	$x_{KN-1}$	$x_{KN}$	$p_K$
$s_i = \sum x_{ij}$						
	$s_1$	$s_2$	...	$s_{N-1}$	$s_N$	

Рис. 1. Матрица результатов тестовых заданий

В столбцах этой матрицы находятся результаты, полученные конкретными испытуемыми по каждому тестовому заданию, а по строкам размещаются результаты каждого испытуемого по соответствующему тестовому заданию. В нижней строке представлены суммарные значения баллов, набранных каждым испытуемым за тест в целом ( $s_i = \sum x_{ij}$ ). Эти значения используются для формирования оценки уровня подготовки испытуемых по проверяемому данным тестом учебному материалу. В правом столбце приведены суммы баллов, полученных всеми испытуемыми для каждого тестового задания (для  $j$ -го задания –  $p_j = \sum x_{ij}$ ). По величине значений  $p_j$  уже можно судить о степени реальной легкости (трудности) конкретных тестовых заданий для испытуемых в данной группе – чем больше испытуемых правильно ответило на конкретное задание, тем это задание в среднем легче для выполнения. Для практического использования, однако, в качестве меры легкости (трудности) заданий более пригодны относительные значения такого рода показателей. Это – индекс легкости задания (ИЛ) и индекс трудности задания (ИТ):

$$\text{ИЛ}_j = \frac{x_{\text{ср } j}}{x_{\text{макс } j}} = \frac{\sum_i x_{ij}}{N \cdot x_{\text{макс } j}} = \frac{p_j}{N \cdot x_{\text{макс } j}},$$

$$\text{ИТ}_j = 1 - \text{ИЛ}_j$$

где  $x_{\text{ср } j}$  – среднее значение баллов, набранных всеми испытуемыми за выполнение  $j$ -го задания,  $x_{\text{макс } j}$  – максимально возможное количество баллов за выполнение  $j$ -го задания.

Эти характеристики (ИЛ и ИТ) тестовых заданий являются мерой легкости (трудности) заданий для конкретной группы испытуемых. Значения этих параметров зависят от уровня подготовки испытуемых и не зависят от их числа. Одно из положений педагогической теории измерений состоит в том, что в тесте не долж-

но быть заданий неизвестной трудности. Важность получения количественных характеристик легкости (трудности) предлагаемых испытуемым заданий состоит в том, что для того, чтобы эти задания обладали способностью дифференцировать испытуемых по уровню их подготовки, т. е. служить средством измерения этого уровня, их сложность должна соответствовать среднему уровню подготовки испытуемых в группе. Тест в целом должен включать в себя комплекс заданий различной сложности – от достаточно простых до трудных, однако очевидно, что слишком простые задания, на которые правильно отвечают все до одного испытуемые, и слишком сложные задания, на которые не может ответить никто из испытуемых, не обладают способностью дифференцировать их по уровню подготовки и в этом смысле они не являются настоящими тестовыми заданиями. Такие задания должны «отбраковываться» и исключаться из теста.

Располагая упорядоченные значения индекса легкости (трудности) заданий теста, как это представлено на рис. 2, можно оценить степень соответствия составляющих тест заданий среднему уровню подготовки испытываемой группы.

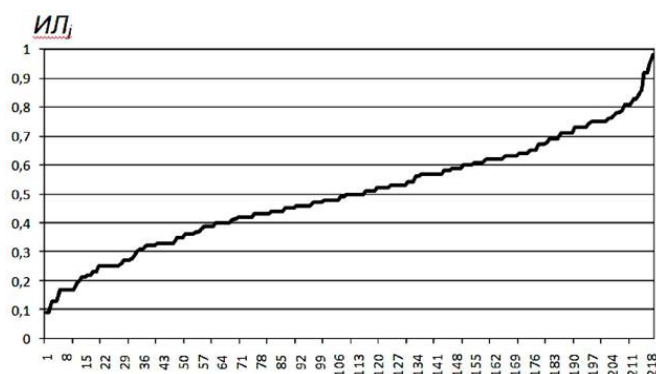


Рис. 2. Значения индекса легкости заданий для тестируемой группы

Представленные данные свидетельствуют о том, что используемая в примере база тестовых заданий достаточно равномерно представляет вопросы различного уровня сложности, при этом очень легких – «очевидных для всех» и очень сложных – «никем не решаемых» (т.е. не тестовых заданий) практически нет, что говорит о соответствии комплекса заданий этого теста среднему уровню подготовки испытываемой группы.

Элементы данного курса ЭУМК были частично получены при проверки знаний по направлению «Информатика и базы данных» для студентов юридического института. Статистика тестирования показала свою эффективность и полезность использования данного курса.

Структура ЭУМК «Информатика и базы данных»:

1. Лекции по темам.
  - 1.1. Введение в информатику.
  - 1.2. Этапы развития компьютерной техники.
  - 1.3. Информация и ее представление в компьютере.
    - 1.3.1. Информация и ее свойства.
    - 1.3.2. Системы счисления и кодирования информации.

- 1.3.3. Способы измерения информации.
- 1.3.4. Системы счисления и кодирования информации.
- 1.3.5. Перевод чисел из одной системы счисления в другую.
- 1.3.6. Способы представления информации в компьютере.
- 1.4. Аппаратное обеспечение современных компьютеров.
  - 1.4.1. Архитектура современного компьютера.
  - 1.4.2. Системный блок.
  - 1.4.3. Устройства ввода-вывода данных.
  - 1.4.4. Устройства и системы хранения данных.
- 1.5. Программное обеспечение современных компьютеров.
- 1.6. Компьютерные сети, их назначение, типы и основные характеристики.
  - 1.6.1. Классификация и основные компоненты информационно-вычислительных сетей.
  - 1.6.2. Адресация узлов, доменные имена.
  - 1.6.3. Основные понятия и принципы построения глобальных сетей. Маршрутизация, протоколы передачи данных.
  - 1.6.4. Новые технологии и стандарты беспроводного доступа.
  - 1.6.5. Сеть Интернет. Современные сервисы сети Интернет.
- 1.7. Информационная безопасность и ее составляющие.
  - 1.7.1. Концепция национальной безопасности.
  - 1.7.2. Методы защиты информации, в том числе сведений, составляющих государственную тайну.
  - 1.7.3. Обзор основных понятий криптологии, алгоритмы шифрования, технологии электронной подписи документов.
  - 1.7.4. Электронная цифровая подпись.
  - 1.7.5. Безопасность в локальных и глобальных сетях.
2. Банки тестовых заданий.
  - 2.1. Вопросы по Microsoft Excel.
  - 2.2. Вопросы по Microsoft Word.
  - 2.3. Вопросы по «Базе данных».
3. Глоссарий.
4. Лабораторные работы.
5. Рекомендуемая литература.

## АЛГОРИТМЫ РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ О ПРОПОЗИЦИОНАЛЬНОЙ ВЫПОЛНИМОСТИ

**Р.Р. Исхаков**

**Научный руководитель д-р физ.-мат. наук В.В. Быкова**

*Сибирский федеральный университет*

Задача о пропозициональной выполнимости (англ. вариант – *SATISFIABILITY*, или коротко *SAT*) формулируется следующим образом. Пусть  $X$  – конечное множество переменных, принимающих значения *false* и *true*. Формула  $F$  в конъюнктивной нормальной форме (КНФ) представляет собой конъюнкцию конечного числа кловов, где клов – дизъюнкция литералов, не содержащая ни одной переменной одновременно с ее отрицанием, а всякий литерал – некоторая переменная  $x \in X$  или ее отрицание  $\neg x$ . Требуется установить, существует ли для входной формулы  $F$ , заданной в КНФ над множеством переменных  $X$ , набор значений переменных, при котором каждый клов формулы  $F$  принимает значение *true* (такой набор принято называть выполняющим). Формула считается выполнимой, если для нее существует хотя бы один выполняющий набор, и невыполнимой, если выполняющего набора не существует.

Входной формуле  $F$  обычно приписывают числовую величину, которая принимает неотрицательные целые значения и характеризует размерность этой формулы. Такие величины называют мерами сложности формулы логики высказываний. В качестве основных мер сложности рассматривают:  $N = |X|$  – число переменных;  $K$  – число кловов;  $L = |F|$  – длину формулы  $F$  как количество входящих в нее литералов. Относительно этих мер сложности традиционно определяют вычислительную сложность (время работы) исследуемого алгоритма решения задачи *SAT*.

Задача *SAT* служит объектом исследований и приложений в таких областях как искусственный интеллект, временная и пространственная логика, теория реляционных баз данных, распознавание образов, автоматическое доказательство теорем, техническое проектирование сложных систем. В 1971 году в статье Стивена Кука был впервые введен термин «*NP*-полная задача», и задача *SAT* была первой задачей, для которой было доказано это свойство. К полиномиально разрешимым случаям для *SAT* приводят следующие классы формул: пустые формулы (не содержат кловов); формулы в 2-КНФ (каждый их клов включает не более двух литералов); хорновские формулы.

Задача *SAT* всегда может быть решена алгоритмом полного перебора, который последовательно анализирует все  $2^N$  различных наборов значений  $N$  переменных. Такой алгоритм устанавливает тривиальную верхнюю оценку вычислительной сложности задачи *SAT* в худшем случае. Поиск алгоритмов, работающих быстрее полного перебора, активно ведется с начала 60-х годов прошлого века и до настоящего времени. Среди них наиболее известными являются алгоритмы, осно-

ванные на локальном поиске, и алгоритмы расщепления (*DPLL*-алгоритмы и *PPSZ*-алгоритмы).

Типичный алгоритм, основанный на локальном поиске, вначале выбирает начальный набор и затем изменяет его шаг за шагом, пытаясь приблизиться к выполняющему набору. Если после определенного количества шагов выполняющий набор не найден, алгоритм порождает другой начальный набор и опять изменяет его шаг за шагом. Число таких попыток ограничено; если ни в одной из них не удастся найти выполняющий набор, алгоритм заканчивает работу, с ответом «Невыполнима».

Алгоритмы расщепления – это декомпозиционные алгоритмы. Они сводят задачу *SAT* для входной формулы  $F$  к конечному числу подзадач, каждая из которых – это *SAT* для формул меньшей сложности, чем сложность  $F$ . Причем это сведение может быть детерминированным (алгоритм производит рекурсивные вызовы самого себя для формул меньшей сложности, полученных при расщеплении  $F$ ) или вероятностным (случайный выбор одной из образованных после расщепления формул). Детерминированные алгоритмы расщепления принято называть *DPLL*-алгоритмами по первым буквам фамилий их авторов: M. Davis, H. Putman, G. Logemann, D. Loveland. Такой алгоритм заменяет входную формулу двумя формулами, полученными присваиванием некоторой переменной  $x$  значений *true* и *false* соответственно. Затем алгоритм упрощает каждую из полученных формул и рекурсивно вызывает процедуру для каждой из упрощенных формул. Основное отличие *PPSZ*-алгоритмов (их авторы R. Paturi, P. Pudlak, M. E. Saks, F. Zane) от *DPLL*-алгоритмов заключается в выборе переменной для присваивания значений *true* и *false*: осуществляется случайный выбор переменной вместо некоторого детерминированного правила. Подавляющее большинство алгоритмов, разработанных за последние пятьдесят лет для задачи *SAT*, базируется на идеях, заложенных в *DPLL*-алгоритмах.

Всякий *DPLL*-алгоритм работает по следующей схеме.

*Вход*: формула  $F$  в КНФ над  $X$ .

*Ответ*: «Выполнима» / «Невыполнима».

1. Редуцировать  $F$ , т. е. преобразовать формулу  $F$  в формулу  $F_0$  меньшей сложности с помощью конечного набора правил редукции. Эти правила применять к  $F$  до тех пор, пока хотя бы одно из них применимо.

2. Если задача *SAT* тривиально решается для  $F_0$ , то выдать соответствующий ответ.

3. Выбрать переменную  $x \in X$  по определенному правилу. Таких переменных может быть несколько. Их число определяется правилом расщепления, употребляемым на следующем шаге.

4. Выполнить расщепление формулы  $F_0$  на конечное число формул меньшей сложности по заданному закону – правилу расщепления, используя различные значения переменных, выбранных на шаге 2.

5. Осуществить рекурсивные вызовы данного алгоритма применительно к полученным формулам. Выдать ответ, основываясь на результатах, возвращенных рекурсивными вызовами: если хотя бы один из рекурсивных вызовов вернул



выполняющий набор, то выдать ответ «Выполнима», и в противном случае – «Невыполнима».

Различные расщепляющие алгоритмы отличаются друг от друга в основном правилами редукции на шаге 1, стратегией выбора переменных на шаге 3, правилами расщепления на шаге 4.

Разработана программа *DPLL-Solver*, реализующая *DPLL*-алгоритм для задачи *SAT*. В программе редуцирование входной формулы выполняется по правилам: «чистый литерал», «единичный клоз», «поглощение», «резолуция». Применяемое на шаге 4 правило расщепления заменяет формулу  $F_0$  на две формулы  $F_1 = F_0[x]$  и  $F_2 = F_0[\neg x]$ , где  $x$  на шаге 3 определяется согласно эвристике: «выбрать переменную, входящую в наибольшее количество клозов». В качестве тривиальных случаев на шаге 2 выступают: пустой клоз (интерпретируется как *false*); пустая формула (интерпретируется как *true*). Для создания программы использована среда разработки *Microsoft Visual Studio 2010 Express*. Входные данные задаются в виде текстового файла в формате *DIMACS*, где указываются: число переменных, число клозов и сами клозы. Выходные данные содержат сведения об использованных правилах редукции и найденный выполняющий набор, если он существует. Разработанная программа может быть использована в многочисленных приложениях задачи *SAT*.

## 5. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ ФУНКЦИЙ

УДК 517.98

### ОБ ОДНОЙ НЕКОЭРЦИТИВНОЙ ЗАДАЧЕ ШТУРМА – ЛИУВИЛЛЯ ДЛЯ ОПЕРАТОРА ЛАМЕ

А.С. Пейчева

Научный руководитель д-р физ.-мат. наук, проф. А.А. Шлапунов

Сибирский федеральный университет

Пусть  $D$  – ограниченная область с липшицевой границей в евклидовом пространстве  $\mathbb{R}^3$ . Мы будем рассматривать комплекснозначные функции, определенные в области  $D$  и ее замыкании  $\bar{D}$ . Для  $s \in \mathbb{Z}_+$  и  $M \subset \bar{D}$  обозначим через  $C^s(\bar{D}, M)$  множество  $s$  раз непрерывно дифференцируемых функций в  $\bar{D}$ , исчезающих в окрестности  $\bar{M}$ . Пусть  $C_0^\infty(D)$  – пространство гладких функций с компактным носителем в  $D$ . Функции класса Гельдера с показателем  $0 < \alpha \leq 1$  на множестве  $M \subset \mathbb{R}^3$  обозначим через  $C^{0,\alpha}(M)$ .

Возьмем  $S \in \partial D$  открытое, связное множество с кусочно-гладкой границей  $Y$ . Пусть  $\rho \in C(\bar{D})$  есть  $C^1$  – гладкая функция в  $\bar{D} \setminus Y$  такая, что  $0 \leq \rho(x) \leq 1$ ,

$x \in \bar{D}$ ,  $\frac{\partial \rho}{\partial x_j} \in L^\infty(D)$ ,  $1 \leq j \leq 3$  и  $\rho(x) = 0 \Leftrightarrow x \in Y$ , например,  $\rho(x)$  – расстояние от  $x \in D$  до  $Y$ . Обозначим через  $H^{s,\gamma}(D)$  весовые пространства Соболева с гладкостью  $s \in \mathbb{R}_+$  и весовой функцией  $\rho$ , а  $\gamma \in \mathbb{R}$ , – как пополнение  $C^s(\bar{D}, Y)$  для  $s \in \mathbb{Z}$  или  $C^1(\bar{D}, Y)$  для  $s \in (0,1)$  по норме, индуцированной скалярным произведением

$$(u, v)_{H^{s,\gamma}(D)} = \sum_{|\alpha| \leq s} (\rho^{|\alpha|-\gamma-s} \partial^\alpha u, \rho^{|\alpha|-\gamma-s} \partial^\alpha v)_{L^2(D)}, s \in \mathbb{Z},$$

$$(u, v)_{H^{s,\gamma}(D)} = (u, v)_{H^{0,\gamma+s}(D)} + (\rho^{-\gamma} u, \rho^{-\gamma} v)_{H^s(D)}, \quad s \in (0,1).$$

Для рассмотрения пространств с отрицательной гладкостью мы будем пользоваться стандартной конструкцией. Пусть  $H^+$  и  $H^0$  – комплексные пространства Гильберта со скалярными произведениями  $(\cdot, \cdot)_+$  и  $(\cdot, \cdot)_0$  соответственно. Предположим, что  $H^+$  непрерывно вложено в  $H^0$  и обозначим через  $J_0 : H^+ \rightarrow H^0$  соответствующее вложение. Кроме того, предположим, что  $H^+$  всюду плотно в  $H^0$ . Тогда пусть  $H^-$  будет пополнение  $H^+$  относительно нормы

$$\|u\|_- = \sup_{v \in H^+, v \neq 0} \frac{|(v, u)_0|}{\|v\|_+}.$$

Следующая лемма хорошо известна.

**Лемма 1.** *Пространство Банаха  $H^-$  топологически изоморфно сопряженному пространству  $(H^+)'$ . Кроме того, изоморфизм определен эрмитовой формой*

$$\langle v, u \rangle = \lim_{v \rightarrow \infty} (v, u_v)_0$$

для  $u \in H^-$  и  $v \in H^+$ , где  $\{u_v\}$  – какая-нибудь последовательность в  $H^+$ , сходящаяся к  $u$  в  $H^-$ . Кроме того, если вложение  $J_0 : H^+ \rightarrow H^-$  компактно, то пространство  $H^0$  компактно вложено в  $H^-$ .

Обозначим через

$$\mathcal{L}_0 = -\mu \operatorname{div} \nabla - (\lambda + \mu) \nabla \operatorname{div}$$

оператор Ламе в  $\mathbb{R}^3$ , где  $\nabla$  – оператор градиента в  $\mathbb{R}^3$ , а  $\mu > 0$ ,  $2\mu + \lambda > 0$  – постоянные коэффициенты. Как известно, если функции  $\mu$ ,  $\lambda$  принадлежат  $C^{0,1}(D)$ , то при этих условиях оператор Ламе сильно эллиптивен и существует такой формально <<неотрицательный>>, самосопряженный оператор  $\mathcal{L}_\mathfrak{D}(x, \partial) = \mathfrak{D}^* \mathfrak{D}$ , который отличается от оператора Ламе слагаемыми низкого порядка; здесь  $\mathfrak{D} = \sum_{j=1}^3 \mathfrak{D}_j \partial_j$  дифференциальный  $(4 \times 3)$ -матричный оператор первого порядка, а  $\mathfrak{D}^*$  формально сопряженный к нему. Один из примеров факторизации и будет рассмотрен в докладе, а именно:

$$\mathfrak{D} = \begin{pmatrix} \sqrt{\mu} \operatorname{rot} \\ \sqrt{2\mu + \lambda} \operatorname{div} \end{pmatrix},$$

где  $rot$  понимается как  $(3 \times 3)$ -матричный оператор, строки которого имеют вид  $(-1)^{i+j} \left( \vec{e}_i \frac{\partial}{\partial x_j} - \vec{e}_j \frac{\partial}{\partial x_i} \right)$ ,  $1 \leq i < j \leq 3$ , где  $\vec{e}_i$  – единичный вектор в  $\mathbb{R}^3$  с – той компонентой, равной единице, представляющий завихренности или стандартный оператор вращения для данного случая.

Рассмотрим  $(3 \times 3)$ -матричный линейный дифференциальный оператор  $A$  в области  $D$ , ассоциированный с  $\mathcal{L}_{\mathfrak{D}}(x, \partial)$ ,

$$A u = \mathfrak{D}^* \mathfrak{D} u + a_1 \mathfrak{D} u + a_0(x)u, \quad (1)$$

здесь  $a_0$  и  $a_1$  есть функциональные  $(3 \times 3)$ - и  $(3 \times 4)$ - матрицы соответственно, а для их компонент  $a_j^{(p,q)}$  справедливо, что  $\rho^2 a_0^{(p,q)} \in L^\infty(D)$ ,  $\rho a_1^{(p,q)} \in L^\infty(D)$ .

Пусть  $\nu_{\mathfrak{D}} = \sum_{j=1}^3 \mathfrak{D}_j^* \nu_j \mathfrak{D}$  – кономальная производная, определенная относительно оператора  $\mathfrak{D}$ , где  $\nu = (\nu_1, \nu_2, \nu_3)$  – векторное поле, состоящее из единичных внешних нормалей по отношению к  $\partial D$  (определенное почти для всех точек  $x \in \partial D$ ).

Теперь введем в рассмотрение граничный оператор

$$B = b_1(x)\nu_{\mathfrak{D}} + b_0(x) + \partial_\tau,$$

где  $\partial_\tau$  – это  $(3 \times 3)$ -матрица, состоящая из касательных производных к  $\partial D$ . О  $(3 \times 3)$ -матрицах  $b_0(x)$  и  $b_1(x)$  будем предполагать, что их компоненты локально измеримые, ограниченные функции на  $\partial D \setminus Y$ . Мы позволим матрице  $b_1(x)$  вырождаться (и даже исчезать) на открытом связном подмножестве  $S$  поверхности  $\partial D$ , имеющем кусочно-гладкую границу  $\partial S$ ; в этом случае предполагается, что матрица  $b_0(x)$  невырожденная на  $S$ , а компоненты касательной, составляющей  $\partial_\tau$ , равны нулю на  $S$ .

Нашей целью будет решение следующей смешанной задачи: по данной обобщенной  $3x$ -мерной векторной функции  $f$  в  $D$ , найти  $3x$ -мерное векторное распределение  $u$  в  $D$ , удовлетворяющее в подходящем смысле

$$\begin{cases} Au = f & \text{в } D, \\ Bu = 0 & \text{на } \partial D. \end{cases} \quad (2)$$

Так как при изучении спектральных свойств задачи мы будем использовать метод возмущения компактных, самосопряженных операторов, то расщепим коэффициенты  $a_0$  и  $b_0$ :

$$a_0 = a_{0,0} + \delta a_0, \quad b_0 = b_{0,0} + \delta b_0,$$

где  $a_{0,0}(x)$  – эрмитова неотрицательная функциональная  $(3 \times 3)$ -матрица в  $D$ , для компонент которой справедливо, что  $\rho^2 a_{0,0}^{(p,q)} \in L^\infty(D)$ , а  $(3 \times 3)$ -матрица  $b_{0,0}$  выбрана так, что матрица  $b_1^{-1} b_{0,0}$  эрмитова неотрицательна на  $\partial D$ .

Пусть  $a_{0,0} \geq 0$ , матрица  $b_1$  обратима, а  $b_1^{-1}b_{0,0} \geq 0$ . Решение задачи ищем в  $H^{+, \gamma}(D)$ , введенном как пополнение функций, гладких в  $\bar{D}$  и исчезающих на  $\bar{S}$ , т. е. пространства  $[C^1(\bar{D}, S)]^3$ , по норме, индуцированной скалярным произведением

$$(u, v)_{+, \gamma, \mathfrak{D}} = (\mathfrak{D} u, \mathfrak{D} v)_{[H^{0, \gamma}(D)]^4} + (a_{0,0} u, v)_{[H^{0, \gamma}(D)]^3} + (b_1^{-1} b_{0,0} u, v)_{[H^{0, \gamma}(\partial D \setminus S)]^3},$$

а  $f$  берем из пространства  $H^{-, \gamma}(D)$ , двойственного к  $H^{+, \gamma}(D)$ .

В работе доказана теорема:

**Теорема 1.** Пусть коэффициенты  $\mu, \lambda$  принадлежат классу  $C^\infty(X)$  в некоторой окрестности  $X$  компакта  $\bar{D}$ , а  $\rho \equiv 1$ . Тогда

1. Пространство  $H^{+, \gamma}(D)$  непрерывно вложено в  $[L^2(D)]^3$ , если существует  $q > 0$  такое, что

$$\rho^2 a_{0,0} \geq q I_3 \text{ в } \bar{D} \setminus Y, \quad (3)$$

2. Пространство  $H^{+, \gamma}(D)$  непрерывно вложено в  $[H^{\frac{1}{2}-\varepsilon, \gamma}(D)]^3$  для любого  $\varepsilon > 0$ , если

$$b_1^{-1} b_{0,0} \geq c_1 I_3 \quad \text{на } \partial D \setminus S, \quad (4)$$

с некоторой постоянной  $c_1 > 0$ . Более того, если  $\partial D \in C^2$ , то из (4) следует, что  $H^{+, \gamma}(D)$  непрерывно вложено в  $[H^{\frac{1}{2}, \gamma}(D)]^3$ .

Перейдем к рассмотрению обобщенной постановки задачи Штурма-Лиувилля. С этой целью предположим, что  $H^{+, \gamma}(D) = H^+$  непрерывно вложено в  $[H^{0, \gamma}(D)]^3 = H^0$  (условия, когда это справедливо, были описаны выше), и обозначим через  $H^{-, \gamma}(D) = H^-$  пополнение пространства  $[H^{1, \gamma}(D, S)]^3$  по соответствующей отрицательной норме  $\|u\|_{-, \gamma}$ :

$$\|u\|_{-, \gamma} = \sup_{v \in [H^{1, \gamma}(D, S)]^3, v \neq 0} \frac{|(v, u)_{[H^{0, \gamma}(D)]^3}|}{\|v\|_{+, \gamma}}.$$

Согласно лемме (1) пространство  $H^{-, \gamma}(D)$  топологически изоморфно сопряженному  $(H^{+, \gamma}(D))'$ . Соответствующее спаривание, описанное в лемме (1) и определяющее изоморфизм, обозначим через  $\langle \cdot, \cdot \rangle_\gamma$ .

Кроме того, интегрируя по частям, получаем, что

$$\begin{aligned} (Au, v)_{[H^{0, \gamma}(D)]^3} &= (\mathfrak{D} u, \mathfrak{D} v)_{[H^{0, \gamma}(D)]^4} + (b_1^{-1}(b_0 + \partial_\tau) u, v)_{[H^{0, \gamma}(\partial D \setminus S)]^3} + \\ &+ ((a_1 \mathfrak{D} u - 2\gamma \rho^{-1}(\mathfrak{D} \rho)^* \mathfrak{D} + a_0) u, v)_{[H^{0, \gamma}(D)]^4} \end{aligned}$$

всех  $u \in [H^{2, \gamma}(D, S)]^3$  и  $v \in [H^{1, \gamma}(D, S)]^3$ , удовлетворяющих граничному условию задачи (2), здесь через  $\mathfrak{D} \rho$  обозначена функциональная матрица  $\sum_{j=1}^3 \mathfrak{D}_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j}$ .

Предположим, что

$$|\delta b_0| \leq \hat{c}_1 |b_{0,0}| \text{ на } \partial D \setminus S$$

с положительной постоянной  $\hat{c}_1$ .

Тогда, если

$$|\delta a_0| \leq \hat{c}_2 |a_{0,0}| \text{ на } \bar{D}$$

с положительной постоянной  $\hat{c}_2$ , или (4) выполнены, мы имеем

$$\begin{aligned} & |(b_1^{-1}(\delta b_0 + \partial_\tau)u, v)_{[L^2(\partial D \setminus S)]^3} + (a_1 \mathfrak{D} u + \delta a_0 u, v)_{[L^2(D)]^3}| \\ & \leq c \|u\|_{+, \gamma} \|v\|_{+, \gamma} \end{aligned} \quad (5)$$

для всех  $u, v \in [H^{1,\gamma}(D, S \cup Y)]^3$ , где  $c$  — некоторая положительная постоянная, не зависящая от  $u$  и  $v$ .

При выполнении условия (5), для каждого фиксированного  $u \in H^{+, \gamma}(D)$  эрмитова форма

$$\begin{aligned} Q(u, v) = & (\mathfrak{D} u, \mathfrak{D} v)_{[H^{0,\gamma}(D)]^4} + (b_1^{-1}(b_0 + \partial_\tau) u, v)_{[H^{0,\gamma}(\partial D \setminus S)]^3} + \\ & + ((a_1 \mathfrak{D} u - 2\gamma \rho^{-1}(\mathfrak{D} \rho)^* \mathfrak{D} + a_0)u, v)_{[H^{0,\gamma}(D)]^4} \end{aligned}$$

определяет непрерывный линейный функционал  $f$  на  $H^{+, \gamma}(D)$  с помощью равенства  $f(v) := \overline{Q(u, v)}$ , для  $v \in H^{+, \gamma}(D)$ . Согласно лемме (1), найдется единственный элемент  $H^{-, \gamma}(D)$ , который мы обозначим через  $Lu$ , такой, что

$$f(v) = \langle v, Lu \rangle_\gamma,$$

для всех  $v \in H^{+, \gamma}(D)$ . Таким образом, мы определили линейный оператор

$$L : H^{+, \gamma}(D) \rightarrow H^{-, \gamma}(D).$$

Как следует из (5), оператор  $L$  ограничен. Ограниченный линейный оператор

$$L_0 : H^{+, \gamma}(D) \rightarrow H^{-, \gamma}(D),$$

определенный этим способом через эрмитову форму  $(\cdot, \cdot)_{+, \gamma}$ , т. е.

$$(v, u)_{+, \gamma} = \langle v, L_0 u \rangle_\gamma \quad (6)$$

для всех  $u, v \in H^{+, \gamma}(D)$ , соответствует случаю  $a_1 = \rho^{-1} \mathfrak{D}^* \rho$ ,  $a_0 = a_{0,0}$  и  $b_0 = b_{0,0}$ .

Итак, мы приходим к обобщенной формулировке задачи (2) в весовых пространствах. По заданному элементу  $f \in H^{-, \gamma}(D)$ , найти  $u \in H^{+, \gamma}(D)$  такую, что

$$\overline{Q(u, v)} = \langle v, f \rangle_\gamma \text{ для всех } v \in H^{+, \gamma}(D). \quad (7)$$

В предположении, что всюду далее  $\iota : H^{+, \gamma}(D) \rightarrow [H^{0, \gamma}(D)]^3$  есть естественное вложение, то для оператора  $L_0^{-1}$  справедлива следующая теорема:

**Теорема 2.** Если  $H^{+, \gamma}(D)$  непрерывно вложено в  $[H^{0, \gamma}(D)]^3$ , то обратный оператор  $L_0^{-1}$  к оператору (6) индуцирует положительные самосопряженные операторы

$$\begin{aligned} \iota' \iota L_0^{-1} : H^{-, \gamma}(D) &\rightarrow H^{-, \gamma}(D), & \iota L_0^{-1} \iota' : [H^{0, \gamma}(D)]^3 &\rightarrow [H^{0, \gamma}(D)]^3, \\ L_0^{-1} \iota' \iota : H^{+, \gamma}(D) &\rightarrow H^{+, \gamma}(D), \end{aligned}$$

которые имеют одинаковые системы собственных векторов и собственных значений; причем собственные значения – положительные. Более того, если  $H^{+, \gamma}(D)$  непрерывно вложено в  $[H^{s, \gamma}(D)]^3$  при  $0 < s \leq 1$ , то эти операторы компактны, порядки их конечны и равны  $2s$ , а собственные вектора образуют ортогональные базисы в  $H^{+, \gamma}(D)$ ,  $H^{-, \gamma}(D)$ ,  $[H^{0, \gamma}(D)]^3$ .

Произведем следующее расщепление

$$\begin{aligned} \delta b_0 &= \delta b_0^{(s)} + \delta b_0^{(c)}, \\ \delta a_0 &= \delta a_0^{(s)} + \delta a_0^{(c)}, \\ \mathfrak{D} &= 2\gamma \rho^{-1}(\mathfrak{D}\rho)^* \mathfrak{D} + (\delta a_1^{(s)} + \delta a_1^{(c)}) \mathfrak{D}, \end{aligned}$$

так, чтобы слагаемые  $\delta b_0^{(c)}$ ,  $\delta a_0^{(c)}$ ,  $\delta a_1^{(c)}$  индуцировали компактные возмущения оператора  $\mathcal{L}_{\mathfrak{D}}$ , слагаемые  $\delta b_0^{(s)}$ ,  $\delta a_0^{(s)}$ ,  $\delta a_1^{(s)}$  – достаточно маленькие. Это дает возможность максимально использовать теорию возмущения.

**Теорема 3.** Пусть  $\mathcal{L}_{\mathfrak{D}}(x, \partial) = \mathfrak{D}^* \mathfrak{D}$ , и справедливо (4),  $\lambda, \mu$  бесконечно дифференцируемы в некоторой окрестности  $\bar{D}$ ,  $\tau = 0$ ,  $\delta b_0^{(c)} = 0$ . Кроме того, пусть выполнено неравенство (3) или  $\rho \equiv 1$ . Если существует  $\varepsilon > 0$  такое, что

$$\rho^{2-\varepsilon} \delta a_0^{(c)} \in L^\infty(D), \quad \rho^{1-\varepsilon} \delta a_1^{(c)} \in L^\infty(D)$$

и

$$\begin{aligned} &\left| (b_1^{-1} \delta b_0^{(s)} u, v)_{[L^2(\partial D \setminus S)]^3} + (\delta a_1^{(s)} \mathfrak{D} u + \delta a_0^{(s)} u, v)_{[L^2(D)]^3} \right| \\ &\leq M \|u\|_{+, \gamma} \|v\|_{+, \gamma} \end{aligned} \tag{8}$$

для всех  $u, v \in [H^{1, \gamma}(D, S \cup Y)]^3$  с некоторой постоянной  $0 < M < 1$ , не зависящей от  $u$  и  $v$ , то задача (7) фредгольмова.

Напомним, что ненулевой вектор  $u$  из области определения  $D(T)$  линейного оператора  $T$  на линейном пространстве  $H$  называется корневым вектором (или, обобщенным собственным вектором) для  $T$ , если найдутся номер  $N \in \mathbb{N}$  и число  $\lambda \in \mathbb{C}$ , удовлетворяющие  $(T - \lambda I)^N u = 0$ , где  $I : H \rightarrow H$  – тождественный оператор в  $H$ . Касательно корневых векторов хотелось бы отметить, что в работе описаны условия полноты корневых функций для несамосопряженной возмущенной задачи в пространствах  $H^{-, \gamma}(D)$ ,  $[H^{0, \gamma}(D)]^3$ ,  $H^{+, \gamma}(D)$ .

Работа выполнена в Сибирском федеральном университете при поддержке гранта Правительства РФ (договор №14.Y26.31.0006) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

УДК 517.55

## ОБ ОБОБЩЕНИИ ТЕОРЕМЫ ХЁРМАНДЕРА ДЛЯ ЗАДАЧИ КОШИ – ГУРСА

**А.А. Яковлев**

**Научный руководитель д-р физ.-мат. наук А.К. Цих**

*Сибирский федеральный университет*

Исследуется вопрос об аналитической разрешимости задачи Коши – Гурса для линейного дифференциального уравнения в частных производных.

Основной результат работы состоит в ослаблении условий на коэффициенты в известной теореме Хёрмандера. Условие Хёрмандера состоит в том, что коэффициент при одной из выделенных старших производных должен значительно превосходить по модулю сумму модулей всех остальных коэффициентов.

Анализ известных результатов Гюнтера позволяет формулировать результаты на языке распределения корней характеристического уравнения.

В качестве основного вспомогательного утверждения была доказана следующая Теорема. Пусть  $P(\xi_1, \xi_2)$  – однородный полином третьей степени, и пусть

$$P(\xi_1, \xi_2) = (\xi_2 - \omega_1 \xi_1)(\xi_2 - \omega_2 \xi_1)(\xi_2 - \omega_3 \xi_1)$$

его разложение на линейные множители. Если  $\omega_1, \omega_2$  и  $\omega_3$  не проецируются на амёбу  $A_{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3}$ , тогда любой полином после деления на  $P(\xi_1, \xi_2)$  даёт единственный остаток в пространстве, порожденном мономами  $\xi^\alpha$ , где  $\alpha$  пробегает объединение полос

$$S = (\{0\} \times \{0, 1, 2, \dots\}) \cup (\{0, 1\} \times \{0, 1, 2, \dots\}).$$

## О ВЛОЖЕНИИ ДВУМЕРНЫХ ТОРОВ И ПРИМЕНЕНИИ К КВАНТОВЫМ КОМПЬЮТЕРАМ

А.С. Керп

Научные руководители д-р физ.-мат. наук А.К. Цих, аспирант кафедры  
ТФ СФУ В.Р. Куликов

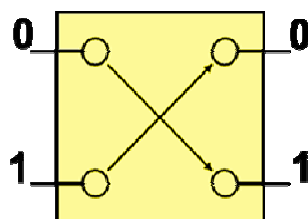
*Сибирский федеральный университет*

### ВВЕДЕНИЕ

Квантовая информатика – новый раздел науки, возникший на стыке квантовой механики, алгоритмов и теории информации. В квантовой информатике изучаются общие принципы и законы, управляющие динамикой сложных квантовых систем. Квантовый компьютер – вычислительное устройство, работающее на основе принципов квантовой механики.

Квантовый компьютер использует для вычисления неклассические алгоритмы, которые реализуются посредством неклассических логических элементов.

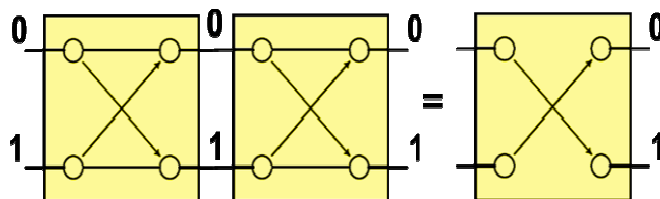
Например, классический логический элемент, отражающий переход к отрицанию, изображается следующей схемой:



Поскольку в логике отрицание высказывания образуется с помощью частицы НЕ, изображенный элемент будем обозначать символом НЕ.

В рамках действительного анализа нельзя построить логический элемент  $\sqrt{\text{НЕ}}$ , т. е. такой, для которого  $\sqrt{\text{НЕ}} \times \sqrt{\text{НЕ}} = \text{НЕ}$ , где под умножением подразумевается последовательное применение элемента. Иными словами, даже в рамках многозначной логики, основанной на классической теории вероятности, уравнение  $X \times X = \text{НЕ}$  не разрешимо. Докажем это.

Отражающая это уравнение техническая схема такая:





Здесь слева подразумеваются две копии одного (неизвестного) логического элемента  $X$ .

Предполагается, что переходы  $0 \rightarrow 0, 0 \rightarrow 1, 1 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 1$  происходят с вероятностями  $P_{00}, P_{01}, P_{10}, P_{11}$ .

Для элемента «НЕ» имеем:

$$P_{00}=P_{11}=0; P_{01}=P_{10}=1.$$

Следовательно, для удовлетворения равенства  $X \times X = \text{НЕ}$  получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} P_{00}P_{00}+P_{01}P_{10}&=0; \\ P_{00}P_{01}+P_{01}P_{11}&=1; \\ P_{10}P_{00}+P_{11}P_{10}&=1; \\ P_{11}P_{11}+P_{10}P_{01}&=0. \end{aligned}$$

Данная схема нереализуема для вещественных неотрицательных значений вероятностей  $P_{ij}$ .

Путь к реализации равенства подсказывает квантовая механика, в которой под амплитудой вероятности перехода  $i \rightarrow j$  подразумевает комплексное число  $c_{ij}$ , для которого  $P_{ij} = |c_{ij}|^2$ . Таким образом, если в приведенной системе уравнений заменить  $P_{ij}$  на комплексные числа  $c_{ij}$ , то тогда следует рассмотреть уравнения:

$$\begin{cases} 0 = |c_{00}c_{00} + c_{01}c_{10}|^2 \\ 1 = |c_{00}c_{01} + c_{01}c_{11}|^2 \\ 1 = |c_{10}c_{00} + c_{11}c_{10}|^2 \\ 0 = |c_{11}c_{11} + c_{10}c_{01}|^2 \end{cases} (*)$$

Некоторые примеры корней данной системы уравнений были представлены в книге Гуца[2]:

$$c_{00} = c_{11} = i/\sqrt{2}; c_{01} = e^{-i\alpha}/\sqrt{2}; c_{10} = e^{i\alpha}/\sqrt{2}.$$

Ранее нами была доказана теорема о полном решении системы (\*):

**Теорема 1.** Все комплексные решения системы (\*) параметризуются в следующем виде через 2 параметра  $\alpha, \beta \in [0; 2\pi]$ :  $c_{00} = c_{11} = e^{i\alpha}/\sqrt{2}$ ,  $c_{01} = e^{i\beta}/\sqrt{2}$ ,  $c_{10} = e^{i(\pi+2\alpha-\beta)}/\sqrt{2}$ .

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Были рассмотрены следующие задачи:

1. Найти математический язык для реализации последовательных применений неклассического элемента  $X$ , то есть  $X^2, X^3, \dots$
2. Найти  $\sqrt[n]{HE}, n \in \mathbb{N}$ , то есть указать решения логического уравнения  $X^n = HE$ .
3. Выяснить вопрос о всех решениях уравнения  $X^n = HE$  для  $n \in \mathbb{N}$ .

**Лемма 1.** Последовательное применение  $n$  раз неклассического элемента  $X$  соответствует возведению в  $n$ -ю степень комплексной матрицы  $C = \begin{pmatrix} c_{00} & c_{01} \\ c_{10} & c_{11} \end{pmatrix}$ , т. е.  $X^n$  соответствует  $C^n$ .

$$\begin{pmatrix} c_{00} & c_{01} \\ c_{10} & c_{11} \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} c_{00}c_{00} + c_{01}c_{10} & c_{00}c_{01} + c_{01}c_{11} \\ c_{10}c_{00} + c_{11}c_{10} & c_{11}c_{11} + c_{10}c_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & e^{i(\alpha-\beta)} \\ e^{i(\alpha+\beta)} & 0 \end{pmatrix}.$$

**Теорема 2.** Частными решениями матричного уравнения  $X^n = HE$  являются следующие матрицы:

$$X_{g,p} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} e^{i\frac{\alpha+\pi(2g+p)}{n}} \left(1 + e^{i\frac{\pi}{n}}\right) & \frac{1}{2} e^{i\left(\frac{\alpha+\pi(2g+p)}{n} - \beta - \pi p\right)} \left(1 - e^{i\frac{\pi}{n}}\right) \\ \frac{1}{2} e^{i\left(\frac{\alpha+\pi(2g+p)}{n} + \beta + \pi p\right)} \left(1 - e^{i\frac{\pi}{n}}\right) & \frac{1}{2} e^{i\frac{\alpha+\pi(2g+p)}{n}} \left(1 + e^{i\frac{\pi}{n}}\right) \end{pmatrix},$$

где  $g = 0, \dots, n-1$ ;  $p = 0, 1$ .

При нечетных  $n$  появляется дополнительный набор решений:

$$X'_{g,p} = \begin{pmatrix} 0 & e^{i\left(\frac{\alpha+2\pi(2g+p)}{n} - \beta - \pi p\right)} \\ e^{i\left(\frac{\alpha+\pi(2g+p)}{n} + \beta + \pi p\right)} & 0 \end{pmatrix}.$$

**Теорема 3.** Все решения матричного уравнения  $X^n = HE$  описываются в виде:

$$\begin{pmatrix} \frac{t_j e^{i\frac{\alpha+2\pi k}{n}}}{1+t_j} & \frac{e^{i\left(\frac{\alpha+2\pi k}{n} - \beta\right)}}{1+t_j} \\ \frac{e^{i\left(\frac{\alpha+2\pi k}{n} + \beta\right)}}{1+t_j} & \frac{t_j e^{i\frac{\alpha+2\pi k}{n}}}{1+t_j} \end{pmatrix},$$

где  $k=0 \dots n-1$  и  $j=0 \dots n-1$ , а  $t_j$  – решения уравнения  $\sum_{k=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} C_n^{2k} t^{n-2k} = 0$ .

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 519.6

### ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КЛАССИФИКАЦИИ

**А.А. Коромылова**

**Научный руководитель М.Е. Семенкина**

*Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. М.Ф. Решетнёва*

В настоящее время интеллектуальные информационные технологии (ИИТ) используются во многих отраслях науки. Это обусловлено увеличивающимися вычислительными мощностями современных компьютеров, которые применяются для решения практических задач, и способностью систем, использующих ИИТ, эффективно решать широкий круг задач.

Однако, как правило, реализация ИИТ – это трудоемкий процесс, требующий больших временных и материальных затрат. Например, при решении конкретной задачи с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) существует проблема выбора их эффективных структур и настройки весовых коэффициентов, а при использовании систем на нечёткой логике (НЛ) необходимо проектировать базы правил и настраивать лингвистические переменные.

В данной работе был реализован генетический алгоритм (ГА) для настройки весовых коэффициентов полносвязных нейронных сетей прямой проводимости (*GA-ANNW*) с произвольным числом скрытых слоев и нейронов на них, так как ГА позволяет эффективно решать задачи глобальной оптимизации. В качестве активационной функции для нейронов на выходном и скрытых слоях используется сигмоида. Весовые коэффициенты записываются в хромосому последовательно в виде двоичного кода. Количество используемых бит зависит от точности настройки и разброса возможных значений весов, и отличается для каждой конкретной задачи.

Эффективность *GA-ANNW* проверялась на 14 тестовых задачах аппроксимации, для решения которых использовались нейронные сети с тремя скрытыми слоями по три нейрона на каждом. Результаты работы реализованного генетического алгоритма для настройки весовых коэффициентов представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты работы *GA-ANNW* на некоторых задачах

№ функции	<i>GA-ANNW</i>		Обратное распространение ошибки
	средняя	лучшая	
1	4,74 %	3,75 %	36,99 %
2	6,73 %	5,63 %	37,16 %
5	10,34 %	8,28 %	38,26 %
10	16,93 %	16,14 %	39,57 %

Тестирование проводилось при помощи разработанной программной системы по следующим правилам:

при каждой настройке генетического алгоритма выполнялось по 100 запусков;

- количество поколений – 1000;
- количество индивидов – 500;
- размер выборки – 500;
- объем обучающей выборки – 70 % от общего числа точек, а тестовой – 30 %;
- результаты представлены для лучших настроек генетического алгоритма;
- ошибка по всем запускам усреднялась (в таблице – «Средняя»);
- в каждом запуске считалась средняя ошибка аппроксимации по формуле

$$\text{error} = \frac{100 \%}{n \cdot |Y_{\max} - Y_{\min}|} \sum_{i=0}^n |\tilde{Y}_i - Y_i|; \quad (1)$$

- в таблице с результатами также указана минимальная из найденных ошибок («лучшая»).

Эффективность работы ИНС также сильно зависит от выбранной структуры. Оптимальную структуру могут определить эксперты, но это потребует больших затрат временных и материальных ресурсов, поэтому предлагается использовать генетический алгоритм для автоматического проектирования структуры ИНС (*GA-ANNS*), который также использует бинарные хромосомы. Для каждого нейрона сначала, случайным образом с определённой вероятностью, равной 1/3, решается, будет ли он использоваться в данной сети. Если нейрона в сети нет, то на его место в хромосому записываются нули. В противном случае для него случайным образом выбирается одна из пятнадцати функций активации, номер которой записывается в двоичном коде.

Далее для каждой выбранной структуры ИНС запускается генетический алгоритм *GA-ANNW* для выбора весовых коэффициентов. Тестирование, результаты которого представлены в табл. 2, проводилось по тем же правилам, что и для *GA-ANNW*.

**Таблица 2.** Результаты работы *GA-ANNS*

№ функции	<i>GA-ANNS</i>			
	Среднее		Лучшее	
	ошибка	количество нейронов	ошибка	количество нейронов
1	0,27 %	3,2	0,13 %	3
2	1,87 %	4,5	1,6 %	3
5	7,18 %	6,3	7,03 %	5
10	7,54 %	7,8	6,86 %	7

*GA-ANNS* решает задачу на приемлемом уровне, значительно лучше, чем *GA-ANNW*. Однако, точность заметно падает при увеличении сложности решаемой задачи, в частности при росте размерности. Поэтому необходимо производить

выбор наиболее информативных признаков, чтобы оставить точность на приемлемом уровне, используя меньше ресурсов.

Особенность генетического алгоритма с выбором наиболее информативных признаков при автоматической настройке ИНС (*GA-ANNinput*) заключается в способе кодирования нейронной сети в бинарную хромосому: сначала записываются все входные переменные, по одному биту на признак, а затем нейроны со скрытых слоев, кодируемые аналогично *GA-ANNs*. При инициализации признак считался неинформативным с вероятностью 0,5.

Методика тестирования алгоритма была описана выше. Результаты представлены в табл. 3.

Сравнивая результаты табл. 2 и 3, видно, что модификация не приносит существенных улучшений, так как размерность тестовых задач мала, т. е. все входы являются информативными. Поэтому для более полной проверки необходимо использовать значительно более сложные задачи.

Генетический алгоритм, настраивающий ИНС, решает задачу на приемлемом уровне, однако является «черным ящиком». Поэтому предлагается использовать системы на нечёткой логике.

**Таблица 3.** Результаты тестирования *GA-ANNinput*

№ функции	<i>GA-ANNinput</i>					
	Среднее			Лучшее		
	ошибка	количество нейронов	количество входов	ошибка	количество нейронов	количество входов
1	0,27 %	3,4	1	0,15 %	3	1
2	1,87 %	4,1	1	1,4 %	4	1
5	7,65 %	5	1,9	7,03 %	4	2
10	9,12 %	8,7	1,6	6,86 %	6	1

При работе с системами на НЛ, возникают две проблемы:

- определение способа кодирования лингвистических переменных;
- выбор оптимальной базы правил.

Лучший способ решения этих проблем – работа с экспертом. Однако это требует материальных и временных затрат, а иногда и вообще не представляется возможным. Поэтому предлагается использовать генетический алгоритм для автоматической настройки систем, основанных на нечёткой логике (*GA-FL*).

Для кодирования лингвистических переменных генерировалась бинарная строка, к которой далее применялись операторы генетического алгоритма. Все нечеткие переменные описываются набором  $(N, X, A)$ , где  $N$  – это название переменной,  $X$  – универсальное множество (область рассуждений),  $A$  – нечеткое множество на  $X$ .

В данной работе одновременно использовались три вида функции принадлежности: треугольная, трапецеидальная и гауссова. Для формирования базы правил так же использовалась бинарная хромосома. Количество битов на одно правило зависело от размерности задачи. Результаты работы *GA-FL* представлены в табл. 4. Его тестирование проводилось по правилам, описанным выше.

**Таблица 4.** Результаты работы генетического алгоритма при настройке систем на нечёткой логике

№ функции	<i>GA-FL</i>			
	Средняя		Лучшая	
	ошибка	количество правил	ошибка	количество правил
1	0,41 %	3,7	0,11 %	4
2	2,37 %	5,2	1,45 %	5
5	7,03 %	5,9	6,89 %	7
10	7,69 %	6,3	7,21 %	7

*GA-FL* решает задачу с приемлемой точностью. Однако точность заметно падает при росте размерности. Чтобы оставить точность на приемлемом уровне, используя меньше ресурсов, предлагается производить выбор наиболее информативных признаков.

Генетический алгоритм для автоматической настройки систем на нечёткой логике с выбором наиболее информативных признаков (*GA-FLinput*) основан на том же принципе выбора информативных признаков, что и *GA-ANNinput*.

Результаты тестирования разработанного алгоритма представлены в табл. 5. Так же, как при использовании *GA-ANNinput*, *GA-FLinput*, при решении тестовых задач, не сильно влияет на эффективность. Это обосновано малой размерностью вектора входных переменных.

**Таблица 5.** Результаты тестирования *GA-FLinput*

№ функции	<i>GA-FLinput</i>					
	Среднее			Лучшее		
	ошибка	количество входов	количество правил	ошибка	количество входов	количество правил
1	0,36 %	1	3,9	0,1 %	1	5
2	1,85 %	1	5	1,51 %	1	6
5	7,43 %	1,9	5,7	7,14 %	2	6
10	7,67 %	1,3	6,8	6,93 %	1	7

Апробация реализованных алгоритмов проводилась на трех задачах анализа данных: классификация ирисов, австралийская и немецкая задачи о кредитах. Данные для анализа были взяты из репозитория автоматического обучения. Результаты представлены в табл. 6. Тестирование проводилось при лучших настройках генетического алгоритма (пропорциональная селекция, двухточечное скрещивание и средняя мутация).

Тестирование модифицированных алгоритмов на задачах аппроксимации не показало существенного улучшения по сравнению с генетическими алгоритмами, которые настраивали структуру нейронной сети или обычных систем на нечёткой логике. Это связано с тем, что у тестовых задач вектор входных переменных небольшой размерности, а следовательно исключение каких-либо признаков либо невозможно, либо ведет к уменьшению точности решения задачи.

**Таблица 6.** Результаты работы алгоритмов при решении практических задач

Название метода	Ирис		Австралийская задача		Немецкая задача	
	Среднее	Лучшее	Среднее	Лучшее	Среднее	Лучшее
<i>GA-ANNW</i>	0,098	0,049	0,132	0,106	0,204	0,127
<i>GA-ANNS</i>	0,043	0,021	0,099	0,087	0,137	0,089
<i>GA-ANN input</i>	0,021	0,017	0,096	0,091	0,121	0,113
<i>GA-FL</i>	0,039	0,03	0,124	0,097	0,195	0,129
<i>GA-FL input</i>	0,024	0,023	0,113	0,098	0,212	0,144

Однако при решении задач большой размерности, как видно из табл. 6, модифицированные алгоритмы показали более высокую точность, при этом для нахождения решения понадобилось меньшее количество вычислительных ресурсов.

Так же была выполнена проверка эффективности реализованных алгоритмов в сравнении с другими методами, которая показала, что *GA-ANNinput* занимает 2-е место для австралийской задачи, т. е. уступает только специально разработанному для таких задач методу, и 6-е место для немецкой задачи. А *GA-FLinput* занимает 4-е и 3-е места соответственно, что является хорошим результатом для незаточенного под задачу метода. Генетические алгоритмы без выбора наиболее информативных признаков показали эффективность, уступающую как модифицированным алгоритмам, так и некоторым из стандартных.

УДК 519.6

## **ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ**

**А.В. Дягель**

**Научный руководитель д-р техн. наук, проф. Е.С. Семенкин**

*Сибирский федеральный университет*

Генетические алгоритмы (ГА) в различных формах применяются при решении многих технических и научных проблем. Одно из наиболее важных применений генетических алгоритмов – оптимизация функций. ГА обладают важными свойствами, благодаря которым они показывают свое превосходство над традиционными методами оптимизации: работают одновременно с множеством решений, используют только значение целевой функции и не используют какую-либо дополнительную информацию, являются стохастической оптимизационной процедурой с глобальным поведением. В то же время, ГА обладают существенным недостатком: их эффективность существенно зависит от точного выбора конфигурации алгоритма, т. е. от типов генетических операторов. На практике данную проблему решают различными способами, среди которых теоретический анализ схо-

димости алгоритма и разработка самоконфигурируемых алгоритмов. Однако эти подходы могут быть применены только высококвалифицированными специалистами в области эволюционной оптимизации. Рядовой пользователь, например, желающий использовать для решения своей задачи *MathLabToolBox*, вынужден прибегать к численным экспериментам с различными конфигурациями ГА и последующим статистическим анализом результатов.

В данной работе последний подход демонстрируется с помощью программной системы С. С. Бежитского, в которой реализован стандартный ГА и обеспечена возможность выбора всех основных операторов, таких как селекция (турнирная, ранговая, пропорциональна и элитарная), скрещивание (одноточечное, двухточечное и равномерное) и мутация (низкая, средняя и сильная). Рабочее окно программной системы приведено на рис. 1.

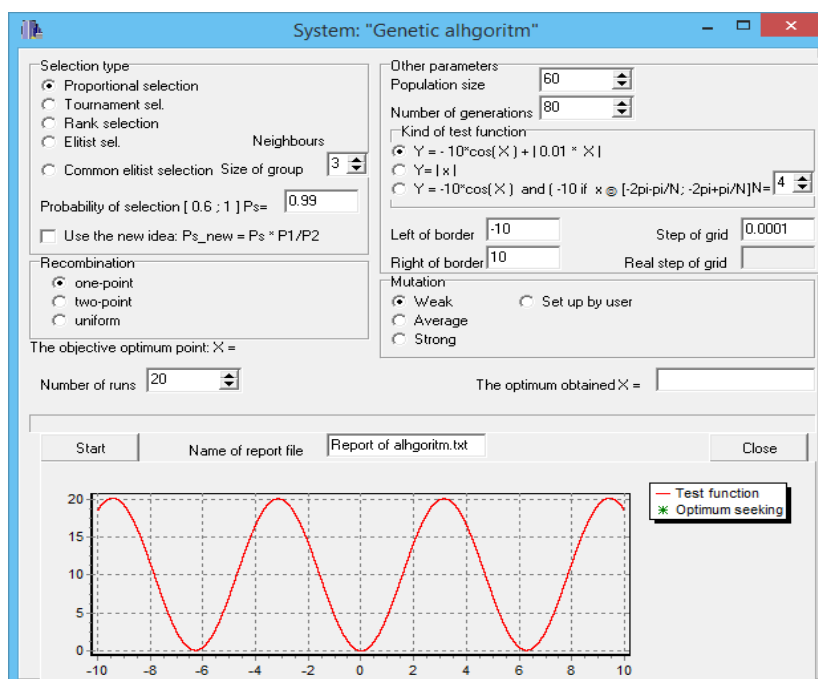


Рис. 1. Пример рабочего окна программной системы

Выбор эффективных конфигураций ГА проводился для задач безусловной оптимизации трех целевых функций одной вещественной переменной:

$$1) y_1 = |x|;$$

$$2) y_2 = -10 * \cos x + |0,01 * x|;$$

$$3) y_3 = \begin{cases} -10 * \cos x - 10, & \text{если } x \in \left[-2\pi - \frac{\pi}{4}; -2\pi + \frac{\pi}{4}\right], \\ -10 * \cos x, & \text{если } x \notin \left[-2\pi - \frac{\pi}{4}; -2\pi + \frac{\pi}{4}\right]. \end{cases}$$

Первая функция – одноэкстремальная, т. е. наиболее легкая для оптимизационных процедур. Вторая функция (см. рис. 1) – многоэкстремальная с локаль-



ными экстремумами, значения которых незначительно отличаются от глобального экстремума, т. е. наиболее трудная для оптимизации. Третья функция носит промежуточный характер – многоэкстремальная, но с локальными экстремумами, значительно отличающимися от глобального.

Для каждой из этих функций было проверено 45 конфигураций алгоритма – три типа скрещивания, три уровня мутации и пять типов селекции (турнирная селекция с тремя различными размерами турнира – 2, 5 и 9). В каждом эксперименте каждому алгоритму выделялся одинаковый вычислительный ресурс – 4800 вычислений целевой функции (60 индивидов в популяции, 80 поколений). Вероятность скрещивания (0,99) не изменялась, элитизм не использовался. Все результаты усреднялись по 20 запускам.

Ниже в табл. 1–3 использованы следующие обозначения: 1т – одноточечное скрещивание, 2т – двухточечное скрещивание, «=» – равномерное скрещивание, числовое значение в столбце «Селекция» означает количество индивидов, участвующих в турнире. Значения, выделенные жирным шрифтом, являются наилучшими.

**Таблица 1.** Оценки эффективности работы ГА на примере функции  $y_1$

Мутация:	Низкая			Средняя			Высокая		
Скрещивание:	1т	2т	=	1т	2т	=	1т	2т	=
Селекция									
Турнирная 2	1 16 [12;23]	1 16 [7;35]	1 14 [7;23]	1 24 [8;52]	1 22 [7;35]	1 26 [11;36]	0,6 35 [11;62]	0,4 40 [5;76]	0,55 34 [10;72]
Турнирная 5	1 8 [3;17]	1 8 [4;14]	1 6 [2;9]	1 8 [3;15]	1 7 [2;13]	1 7 [4;12]	1 14 [6;36]	1 11 [7;29]	1 11 [1;22]
Турнирная 9	1 6 [4;12]	1 6 [2;12]	1 6 [4;10]	1 7 [4;12]	1 6 [2;11]	1 6 [3;8]	1 8 [5;13]	1 8 [5;11]	1 7 [4;10]
Пропорциональная	0,2 30 [14;43]	0,25 26 [4;56]	0,45 38 [10;68]	0,35 44 [15;72]	0,3 43 [18;58]	0,35 35 [6;80]	0,15 60 [44;70]	0,15 37 [11;43]	0,05 51 [51;51]
Ранговая	1 18 [4;33]	1 15 [8;28]	1 14 [7;24]	1 26 [11;53]	1 22 [6;43]	1 23 [6;45]	0,5 40 [20;78]	0,5 38 [11;73]	0,65 36 [18;60]

**Таблица 2.** Оценки эффективности работы ГА на примере функции  $y_2$

Мутация:	Низкая			Средняя			Высокая		
Скрещивание:	1т	2т	=	1т	2т	=	1т	2т	=
Селекция									
Турнирная 2	0,95 21 [5;35]	0,85 25 [10;59]	0,7 19 [7;36]	0,95 34 [15;61]	0,9 23 [7;66]	0,5 23 [10;32]	0,4 27 [7;50]	0,8 21 [17;43]	0,15 31 [9;76]
Турнирная 5	0,95 14 [2;64]	1 9 [4;34]	0,9 15 [6;51]	1 9 [5;17]	1 9 [5;18]	0,9 9 [3;15]	1 15 [4;35]	1 17 [6;30]	0,85 11 [7;31]
Турнирная 9	1 7 [4;15]	0,95 13 [3;59]	1 11 [4;48]	1 8 [4;14]	1 8 [4;29]	1 7 [4;14]	1 9 [5;16]	1 9 [2;22]	1 7 [5;18]
Пропорцио- нальная	0,2 43 [9;63]	0,15 29 [3;72]	0,1 29 [15;43]	0,25 41 [9;76]	0,15 49 [16;78]	0,2 41 [27;71]	0,15 32 [12;58]	0,05 36 [36;36]	0,1 37 [14;63]
Ранговая	0,9 19 [7;50]	0,95 25 [10;55]	0,65 23 [7;66]	0,9 30 [12;74]	0,85 43 [6;74]	0,45 28 [9;52]	0,2 35 [21;64]	0,3 35 [15;58]	0,2 21 [9;65]

**Таблица 3.** Оценки эффективности работы ГА на примере функции  $y_3$

Мутация:	Низкая			Средняя			Высокая		
Скрещивание:	1т	2т	=	1т	2т	=	1т	2т	=
Селекция									
Турнирная 2	0,85 27 [10;74]	0,9 15 [7;47]	0,45 19 [8;28]	0,9 20 [6;51]	0,85 16 [11;55]	0,6 11 [8;41]	0,65 23 [5;70]	0,5 21 [7;58]	0,7 29 [15;74]
Турнирная 5	0,9 22 [6;65]	0,9 21 [4;59]	0,6 32 [5;76]	0,9 7 [4;17]	0,85 6 [3;14]	0,65 6 [5;15]	0,95 26 [3;75]	0,85 10 [7;24]	0,85 9 [3;29]
Турнирная 9	0,7 12 [3;57]	0,7 22 [4;43]	0,55 19 [2;33]	0,6 24 [5;56]	0,9 9 [3;39]	0,8 8 [3;27]	0,9 9 [5;18]	0,9 5 [3;22]	0,85 11 [4;33]
Пропорцио- нальная	0,55 23 [5;65]	0,6 29 [4;77]	0,45 17 [8;31]	0,7 30 [6;77]	0,7 23 [5;61]	0,55 17 [7;64]	0,6 37 [4;48]	0,75 19 [6;58]	0,55 27 [4;61]
Ранговая	0,8 8 [2;22]	0,7 26 [6;51]	0,55 18 [6;32]	0,9 35 [7;59]	0,8 26 [10;40]	0,55 23 [9;34]	0,6 33 [4;73]	0,55 38 [3;76]	0,4 28 [10;73]

Полученные в ходе численного эксперимента оценки эффективности различных конфигураций ГА по трем критериям, приведенные в табл. 1–3, имеют следующий смысл. Главным критерием эффективности является надежность, т. е. доля успешных запусков, когда алгоритм находил глобальный оптимум с заданной точностью (первое число в ячейках таблиц). Если несколько конфигураций демонстрируют одинаковую надежность, то лучший алгоритм определялся по минимуму затрат на поиск, показателем которых является усредненный по успешным запускам номер поколения (второе число в ячейках таблиц), на котором впервые был найден искомый оптимум (алгоритм не останавливается в этом случае, а продолжает работу до конца, т. к. априорная информация об оптимуме ему не предоставляется). Если и второй критерий оказывался одинаковым, то лучшим алгоритмом признавался тот, у которого был минимальный разброс по номерам поколений первого обнаружения оптимума (в ячейке таблицы указан интервал разброса номеров поколений, полученных в успешных запусках).

В приведенных выше таблицах мы наблюдаем, что для первой функции самая высокая надежность (1), средний номер поколения, на котором впервые встретилось оптимальное решение (6) и минимальный разброс поколений [3;8] достигаются при средней мутации, равномерном скрещивании и турнирной селекции с размером турнира 9. У второй функции самая высокая надежность (1), средний номер поколения (7) и минимальный разброс поколений [4;14] достигаются при средней мутации, равномерном скрещивании и турнирной селекции с размером турнира 9. У третьей функции максимальная надежность (0,95), средний номер поколения (26) и разброс поколений [3;75] достигаются при высокой мутации, одноточечном скрещивании и турнирной селекции с размером турнира 5.

Дополнительные наблюдения состоят в том, что на разных задачах лучшие конфигурации существенно отличаются, при этом на всех задачах неудачный выбор конфигурации алгоритма может привести к его неэффективной работе (надежность 0,05, 0,1), поэтому выбор настроек «наугад» неприемлем. В то же время существуют различные удачные конфигурации, дающие очень высокую надежность (1,00, 0,95), хотя и при очень разных затратах на оптимизацию. Надежно установить лучшую конфигурацию можно, но это требует многократного решения одной и той же задачи (в нашем случае каждая задача была решена по 900 раз), что не может быть признано удачным подходом для практических задач, обычно требующих серьезных вычислительных ресурсов на однократное вычисление целевой функции.

Поэтому основным подходом в развитии эволюционных методов оптимизации должно быть внедрение в практику самонастраивающихся алгоритмов, разработанных экспертами.

## **МЕТОД ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ**

**Д.В. Федотов**

**Научный руководитель д-р техн. наук Е.С. Семёнкин**

*Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М.Ф. Решетнева*

Интеллектуальные информационные технологии широко применяются для решения практических задач. Однако реализация подобных систем является трудоемким процессом, требующим значительных временных и денежных затрат. В случае применения нейронной сети для решения определенной прикладной задачи перед исследователем возникает проблема выбора архитектуры нейронной сети, которая освещена не так подробно, как, например, настройка коэффициентов. При выборе архитектуры нейронной сети важно найти «золотую середину». Недостаточная сложность ведет к большой, недопустимой ошибке, в то время как избыточная сложность ведет к восприятию шума за сигнал, что лишает нейронную сеть свойства обобщения.

Для устранения проблем, вызываемых выбором неправильной архитектуры нейронной сети применительно к определенной прикладной задаче, предлагается создать систему, позволяющую автоматически проектировать нейронные сети. Для реализации данной системы может использоваться метод генетического программирования, который позволяет закодировать архитектуру нейронной сети, включающую в себя структурные связи между нейронами и слоями, а также активационные функции нейронов. Метод генетического программирования позволяет отыскивать архитектуру нейронной сети, которая обеспечивает относительно небольшую ошибку по сравнению со средней ошибкой, получаемой в результате выбора произвольной архитектуры.

При выборе элементов функционального и терминального множеств необходимо руководствоваться тем, что дерево должно удовлетворять условиям достаточности и замкнутости. Для обеспечения достаточности необходимо, чтобы набор элементов терминального и функционального множеств позволял кодировать любое решение из поискового пространства. Для обеспечения замкнутости необходимо, чтобы набор элементов терминального и функционального множеств позволял кодировать только допустимые решения. Пример недопустимого решения можно привести, включив в функциональное множество операцию деления, а в терминальное – число 0. Такая комбинация может привести к делению на 0, что является недопустимым. При рассмотрении метода генетического программирования для создания нейронных сетей недопустимыми решениями являются: подача на входной нейрон сигнала с межслойного (или другого входного) нейрона; объединение в один слой входного и межслойного нейрона. В таких случаях

предлагается адаптировать дерево, заменив один из элементов другим из этого же множества, который приведет к допустимому решению.

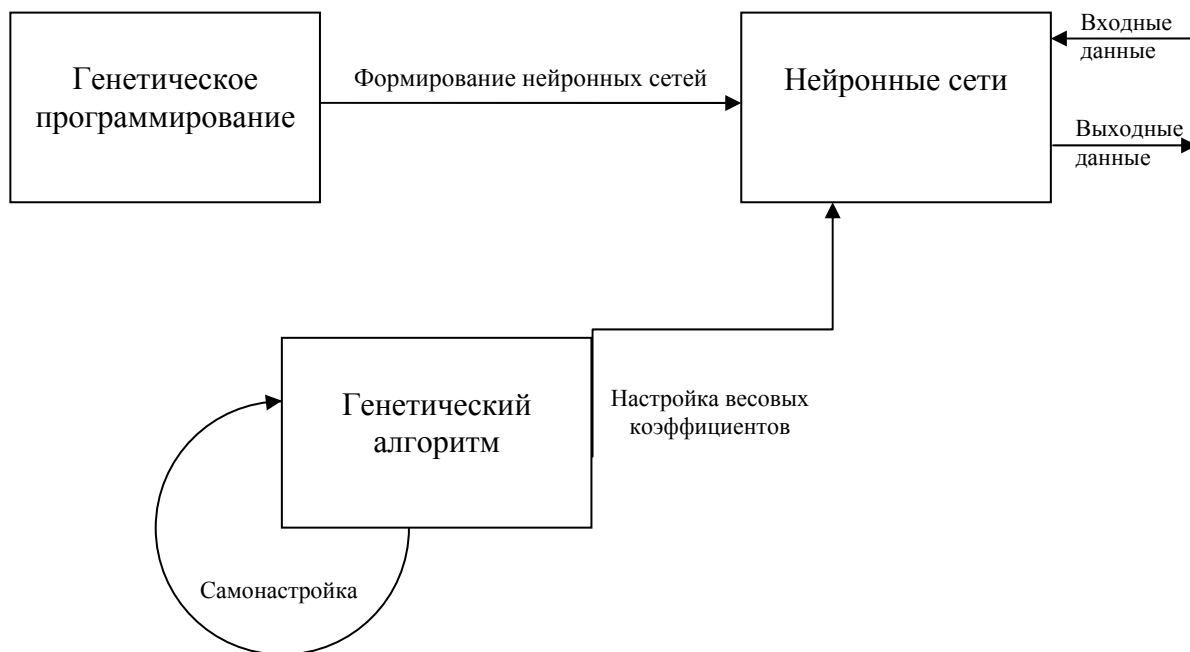
Для обеспечения гибкости решений, предоставляемых методом генетического программирования, требуется возможность создания неполносвязных сетей с произвольной связью между нейронами и слоями. Для таких сетей применение стандартных алгоритмов обучения, таких как обратное распространение ошибки, недопустимо, поэтому существует необходимость выбрать иной алгоритм. Поскольку задача обучения нейронной сети сводится к задаче многомерной оптимизации, минимизирующей критерий:

$$E(w) = \frac{1}{2} * \sum_i \left( y_i^{(N)} - output_i \right)^2,$$

допустимо использовать любые методы оптимизации, которые применимы к подобным задачам. Одним из примеров такого метода может служить генетический алгоритм. Генетические алгоритмы относятся к так называемым эволюционным методам поиска, моделирующим процессы природной эволюции. Генетические и эволюционные алгоритмы являются алгоритмами глобального поиска и используются для решения различных задач оптимизации, в том числе и для задачи оптимизации сложных систем. Независимыми переменными в данном случае являются набор весов нейронной сети, а оптимизируемым критерием – ошибка нейронной сети с предоставленными параметрами (формула вычисления ошибки приведена выше).

В свою очередь генетический алгоритм также имеет параметры, влияющие на его работу, например, тип селекции, скрещивания, вероятность мутации, размер популяции, точность и т. д. Выбор лучшей структуры является еще одной оптимизационной задачей, которую также можно решить с помощью генетического алгоритма. Таким образом, получается самонастраивающийся генетический алгоритм, который осуществляет настройку весов нейронных сетей, формируемых с помощью генетического программирования. В качестве алгоритма самонастройки предлагается использовать SelfCGA [1] ввиду его высокой работоспособности. Также для улучшения работы системы в целом предлагается использовать модифицированный оператор равномерного скрещивания в методе генетического программирования [2]. Ниже приведена схема комбинирования интеллектуальных информационных технологий, предлагаемая в данной работе (рисунок).

Подобное комбинирование интеллектуальных информационных технологий позволяет создавать неполносвязные нейронные сети произвольной структуры, с межслойными связями и различными активационными функциями в пределах одного слоя. Использование метода генетического программирования позволяет выбирать лучшее решение, чем при выборе произвольной структуры, к тому же данный метод требует меньше временных ресурсов, чем метод проб и ошибок, а также практически исключает необходимость вмешательства человека (исследователя) в процесс формирования нейронных сетей.



*Рис. Схема использования ИИТ в данной работе*

Применение генетического алгоритма для настройки весовых коэффициентов обеспечивает нейронную сеть приемлемым значением ошибки, а также, что немаловажно, не накладывает никаких ограничений на структуру нейронной сети, ее параметры и активационные функции нейронов. Кроме того, самонастройка генетического алгоритма позволяет повысить автоматизацию всего процесса в целом, что несомненно является положительным качеством. Вмешательство исследователя сводится к минимуму, что при грамотной реализации и гибкости обработки входных данных делает представленную систему простой и эффективной в применении.

### **Список литературы**

1. Semenkin E. Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator // 2012 Lecture Notes in Computer Science (including sub-series Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 7331 LNCS (PART 1), pp. 414–421.
2. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic programming algorithm with modified uniform crossover // 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2012.

## 6. ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА И ФИНАНСОВО-АКТУАРНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 519.178

### АЛГОРИТМЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ ЗАДАЧИ О НАИБОЛЬШЕЙ КЛИКЕ ГРАФА

**Р.Е. Илларионов**

**Научный руководитель д-р физ.-мат. наук В.В. Быкова**

*Сибирский федеральный университет*

Задача о наибольшей клике (*Maximum Clique Problem, MCP*) является одной из известных *NP*-трудных задач теории графов, для которой пока не найдено алгоритмов, разрешающих эту задачу за полиномиальное время. Между тем, данная задача имеет многочисленные приложения. В биоинформатике *MCP* используется при компьютерном анализе геномных баз данных, например при поиске потенциальных регуляторных структур рибонуклеиновых кислот. В социальных сетях *MCP* применяется при кластеризации данных – при разделении различных сообществ на группы (кластеры), обладающие общими свойствами. Выделение кластеров позволяет обрабатывать каждый из них отдельным вспомогательным сервером. В химии задача *MCP* лежит в основе поиска «максимальной общей подструктуры» в графе, описывающем структуру химического соединения. Кроме того, *MCP* является математической моделью ряда задач, возникающих при автоматизации проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

В указанных приложениях, как правило, необходимы точные решения для *MCP*. При этом объем входных данных огромный (входные графы могут содержать до миллиона вершин). Таким образом, актуальным направлением исследования *MCP* является разработка новых подходов нахождения точных решений с учетом особенностей графов, возникающих в приложениях. В настоящем докладе предлагается модификация известного классического алгоритма Уилфа, позволяющего находить решение задачи *MCP* для разреженных графов за приемлемое время.

Пусть  $G = (V, E)$  – неориентированный конечный граф с множеством вершин  $V$  и множеством ребер  $E$ ,  $|V| \geq 1$  и  $|E| \geq 0$ . Множество всех вершин графа  $G$ , смежных с некоторой вершиной  $x \in V$ , образует в  $G$  окрестность вершины  $x$ , которая обозначается через  $N(x)$ . Множество вершин  $V' \subseteq V$  называется кликой графа  $G$ , если в графе  $G(V')$  всякие две вершины смежны, и максимальной кликой, если она не содержится в клике с большим количеством вершин. Размер наибольшей (по числу вершин) клики графа  $G$  обозначается  $\phi(G)$  и называется плотностью (или кликовым числом) графа  $G$ . Граф  $G = (V, E)$ , являющийся кликой, называется полным графом и обозначается через  $K_n$ , где  $n = |V|$ . Для него  $\phi(K_n) = |V|$ .

В общем случае для графа  $G = (V, E)$  всегда  $1 \leq \varphi(G) \leq |V|$ . Подмножество  $V' \subseteq V$  полагается независимым в графе  $G = (V, E)$ , если подграф  $G(V')$  не содержит ребер. Наибольшее по мощности независимое множество называется наибольшим. Число вершин в наибольшем независимом множестве – это число независимости графа  $G$ , которое обозначается через  $\alpha_0(G)$ . Число вершин в наибольшем независимом множестве – это число независимости графа  $G$ , которое обозначается через  $\alpha_0(G)$ . Число независимости графа и плотность дополнительного графа также связаны между собой по формулам:  $\alpha_0(G) = \varphi(\bar{G})$ ,  $\varphi(G) = \alpha_0(\bar{G})$ .

Распознавательный вариант задачи МСР можно сформулировать следующим образом.

**УСЛОВИЕ.** Заданы граф  $G = (V, E)$  и положительное число  $K \leq |V|$ .

**ВОПРОС.** Верно ли, что  $G$  содержит клику размера не менее  $K$ ? Иными словами, существует ли подмножество  $V' \subseteq V$ , такое, что  $|V'| \geq K$  и любые две вершины в  $V'$  соединены ребром из  $E$ ?

Легко показать, что необходимым и достаточным условием для существования в  $G$  клики размера  $K$  является наличие независимого множества размера не менее  $K$  в дополнительном графе. Таким образом, зная точное решение задачи о независимом множестве вершин, можно указать точное решение задачи МСР, и наоборот.

Наиболее известными алгоритмами нахождения точного решения задачи МСР являются алгоритм Брона – Кербоша и алгоритм Уилфа. Алгоритм Брона – Кербоша является рекурсивной процедурой, которая наращивает кандидатскую клику, рассматривая на каждом шаге одну вершину. Алгоритм добавляет эту вершину в клику или включает ее в набор исключенных вершин – вершин, которые не могут быть в клике. Показано, что время работы алгоритма Брона – Кербоша составляет  $O(\text{poly}(n) \cdot 3^{n/3}) = O(\text{poly}(n) \cdot 1,4422^n)$ , где  $\text{poly}(n)$  – некоторый полином от  $n = |V|$ . Алгоритм Брона – Кербоша многократно совершенствовался. Самая быстрая модификация данного алгоритма находит точное решение МСР за время  $O(\text{poly}(n) \cdot 2^{0,249n}) = O(\text{poly}(n) \cdot 1,1888^n)$ .

Алгоритм Уилфа также является рекурсивной процедурой. Однако он находит не наибольшую клику, а наибольшее независимое множество вершин графа. Алгоритм Уилфа базируется на следующем очевидном факте: для любой фиксированной вершины  $x$  есть два вида независимых множеств: те, которые содержат  $x$  и те, которые не содержат  $x$ . Если независимое множество содержит  $x$ , то вершины, которые находятся в  $N(x)$ , не могут находиться в этом независимом множестве. Так что поиск надо продолжать в графе  $G - \{x\} - N(x)$ . Если независимое множество не содержит  $x$ , то поиск следует продолжать в графе  $G - \{x\}$ .

Показано, что время работы алгоритма Уилфа составляет  $O(\text{poly}(n) \cdot 1,39^n)$ . Данное время может быть улучшено, если входной граф предварительно разбить на атомы – подграфы, не содержащие кликовых минимальных сепараторов. Говорят, что множество вершин  $S \subseteq V$  разделяет несмежные вершины  $a$  и  $b$  графа  $G = (V, E)$ , если в графе  $G(V \setminus S)$  вершины  $a$  и  $b$  принадлежат различным компонентам связности. Множество  $S$  при этом называется  $(a, b)$ -сепаратором и минимальным  $(a, b)$ -сепаратором, если  $S$  есть  $(a, b)$ -сепаратор, и в нем нет собственного



подмножества, являющегося  $(a, b)$ -сепаратором. Сепаратор  $S$  считают минимальным, если в графе  $G$  существует такая пара вершин  $a$  и  $b$ , что  $S$  – минимальный  $(a, b)$ -сепаратор. В частности, одновершинный сепаратор – точка сочленения графа. Разделение графа на атомы является обобщением разложения графа на блоки точками сочленения. Такое разделение сохраняет все клики исходного графа и не порождает новых клик. Для разреженного графа  $G = (V, E)$  размер атома (число вершин подграфа, образующего атом), как правило, ограничен сверху некоторой константой  $k < n$ , а число атомов не превышает  $n = |V|$ . Разложить граф  $G = (V, E)$  на атомы можно за время  $O(n^3)$ .

Применение алгоритма Уилфа к каждому атому позволяет найти максимальную клику входного графа в границах отдельного атома, при этом алгоритм затрачивает время  $O(\text{poly}(k) \cdot 1,39^k)$ , где  $\text{poly}(k)$  – некоторый полином от числа вершин атома. Наибольшая клика определяется как наибольшая по мощности клика из всех найденных максимальных клик. Таким образом, для вычисления наибольшей клики графа  $G = (V, E)$  необходимо время  $O(n \cdot \text{poly}(k) \cdot 1,39^k)$ . Заметим, что это время линейно зависит от  $n$  и экспоненциально от  $k$ . Чем меньше значение  $k$  (чем более разреженным является граф), тем быстрее работает алгоритм.

Модифицированный алгоритм Уилфа был программно реализован в среде Delphi 7. Входными данными программы является описание графа в виде списка ребер. Выход программы – плотность входного графа и его наибольшая клика. Вычислительные эксперименты подтвердили эффективность предложенной модификации алгоритма Уилфа на разреженных графах.

УДК 004.9

## ИЗУЧЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОСТАНОВОК ЗАДАЧИ О РЮКЗАКЕ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ

**М.М. Додонова**

Научный руководитель канд. физ.-мат. наук, доц. И.В. Баранова

*Сибирский федеральный университет*

### **Введение**

Практика порождает все новые и новые задачи оптимизации, причем их сложность растет. Реальные прикладные задачи дискретной оптимизации очень сложны. Современные методы оптимизации далеко не всегда справляются с решением реальных задач без помощи человека. Требуется новые математические модели и методы, которые позволяют учитывать наличие многих критериев и проводят глобальный поиск оптимума. Следует отдавать предпочтение таким методам, которыми проще управлять в процессе решения задачи.

Целью данной работы является изучение различных вариантов постановки задачи о рюкзаке, реализация основных методов решения данных задач, классификация и сравнение этих методов.

Задача о ранце (рюкзаке) — одна из NP-полных задач комбинаторной оптимизации. Своё название задача получила от оптимизационной задачи укладки как можно большего числа ценных вещей в рюкзак при условии, что общий объём (или вес) всех предметов, способных поместиться в рюкзак, ограничен. Задача о рюкзаке является актуальной и достаточно востребованной с точки зрения ее приложения в реальной жизни. Задача о загрузке (о рюкзаке) и её модификации часто возникают в экономике, прикладной математике, криптографии, генетике и логистике для нахождения оптимальной загрузки транспорта (самолёта, поезда, трюма корабля) или склада.

В работе рассматриваются четыре наиболее популярных алгоритма решения данной задачи: полный перебор, жадный и генетический алгоритмы, а также метод ветвей и границ (как сокращение метода полного перебора). Все методы разделены на две группы. Первую группу образуют точные методы, к которым относятся полный перебор и метод ветвей и границ. Вторая группа – приближенные методы, она представлена жадным и генетическим алгоритмом.

### **Классическая постановка задачи о рюкзаке**

Пусть имеется набор предметов, каждый из которых имеет два параметра – вес и ценность. Имеется рюкзак с некоторым заданным значением вместимости. Задача заключается в том, чтобы собрать рюкзак с максимальной ценностью предметов внутри, соблюдая при этом весовое ограничение рюкзака.

Математически постановка задачи формулируется следующим образом: пусть имеется  $n$  предметов. Для каждого  $i$ -го предмета задан его вес  $p_i > 0$  и стоимость (ценность)  $c_i > 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Задано ограничение на максимальный вес рюкзака –  $P$ . Каждый  $x_i$  может принимать только одно из двух значений:  $x_i = 1$ , если  $i$ -й предмет упаковывают в рюкзак, или  $x_i = 0$ , в противном случае.

Требуется выбрать из заданного множества предметов набор с максимальной суммарной стоимостью  $\sum_{i=1}^n c_i x_i$  при одновременном соблюдении ограничения

на суммарный вес найденного набора  $\sum_{i=1}^n p_i x_i \leq P$ .

### **Классификация и сравнение методов решения задачи о рюкзаке**

Существует несколько разновидностей задачи о ранце, отличия между которыми заключаются в условиях, наложенных на рюкзак, предметы или их выбор:

- *рюкзак 0-1*, или *классическая задача* – каждый предмет можно брать только один раз;
- *ограниченный рюкзак* – каждый предмет можно брать определенное количество раз;

- *неограниченный рюкзак* – каждый предмет можно брать сколько угодно раз;
- *непрерывный рюкзак* – возможно брать любую дробную часть от предмета;
- *рюкзак с мультивыбором* – есть несколько классов предметов, из которых можно брать одного представителя, причём некоторые вещи имеют больший приоритет, чем другие;
- *мультипликативный рюкзак* – есть несколько рюкзаков с различной вместимостью;
- *многомерный рюкзак* – есть более одного ограничения на рюкзак.

Существует ряд методов, позволяющих находить решение задачи о ранце. В данной работе рассматривались следующие методы (для всех семи приведенных выше постановок задачи):

- полный перебор,
- метод ветвей и границ,
- жадный алгоритм,
- генетический алгоритм.

Задача о рюкзаке является NP-полной, т. е. для нее не существует полиномиального алгоритма, решающего её за разумное время. Если перебирать все возможные подмножества данного набора из  $n$  предметов, то получится решение сложности не менее чем  $O(2^n)$ . В настоящее время неизвестен (и, скорее всего, вообще не существует) алгоритм решения этой задачи, сложность которого является многочленом от  $n$ .

**Таблица 1.** Предметы для практической задачи рюкзака

	Предмет	Вес	Стоимость		Предмет	Вес	Стоимость
1	рыба	6	5	11	колбаса	5	9
2	молоко	4	3	12	огурцы	6	9
3	сок	3	1	13	клей	2	5
4	хлеб	2	3	14	вата	4	5
5	телефон	5	6	15	тетрадь	5	10
6	мясо	7	9	16	кефир	7	8
7	вода	4	8	17	кофе	4	7
8	бумага	2	6	18	курица	9	10
9	яблоки	9	10	19	масло	5	7
10	сыр	3	7	20	шоколад	3	6

В работе рассматривался практический пример задачи о рюкзаке с максимальной вместимостью рюкзака  $P = 30$  и количеством предметов  $n = 20$ .

С помощью перечисленных методов были найдены решения всех семи вариантов задачи о рюкзаке, а также выполнено сравнение методов по скорости и точности нахождения решения. Проведенное сравнение показано в табл. 1.

**Таблица 2.** Сравнительный анализ методов

Метод	Тип алгоритма	Сложность	Плюсы	Минусы
Полный перебор	точный	$O(N!)$	Простота реализации; точное решение	Входные данные не велики; временная сложность
Метод ветвей и границ	точный		Возможно значительное сокращение времени; простота реализации	Работает как полный перебор
Жадный алгоритм	приближенный	$O(N \cdot \log(N))$	Высокая скорость; может работать с большими значениями $N$ ; простота реализации	Решение неточное
Генетический алгоритм	приближенный		Высокая скорость; может работать с большими значениями $N$ ; независимость от вида исходных данных	Не гарантирует нахождение оптимального решения
Метод динамического программирования	точный	$O(W \cdot N)$	Независимость от вида исходных данных; точное решение	Большой объём вычислительной работы

При выборе алгоритма решения приходится выбирать между точными алгоритмами, которые не применимы для рюкзаков большой размерности, и приближенными, которые работают быстро, но не обеспечивают оптимального решения задачи. Выбор использования того или иного метода является спорным вопросом. Всё зависит от постановки задачи, а также от того, какие цели поставлены. Если требуется найти точное решение, то необходимо использовать точные методы. В ситуации небольшого набора входных данных (до 10–20 предметов) лучше применять методы перебора или ветвей и границ в силу простоты реализации. Если же точность решения не играет большой роли или входные данные таковы, что ни один из точных методов не работоспособен, то для решения задачи можно использовать лишь приближенные алгоритмы.

### Выводы

Поскольку метод полного перебора очень трудоемкий, то размер рюкзака и количество предметов при его использовании должны быть ограничены. Следовательно, этот метод неприменим для неограниченного и непрерывного рюкзаков. При

решении перебором задач мультипликативного и ограниченного рюкзаков необходимо уменьшить количество предметов до 10, чтобы решение было найдено.

Очевидным недостатком алгоритма метода ветвей и границ при решении задач большой размерности является необходимость перебрать слишком большое количество вариантов перед тем, как будет найден оптимальный. Несомненно, метод ветвей повторяет перебор. Однако, благодаря отсечению «бесполезных» решений, может самостоятельно ограничить бесконечное пространство решений. Поэтому его можно применить для неограниченного рюкзака, но нельзя применить для непрерывного рюкзака.

Жадный алгоритм является однокритериальным алгоритмом, поэтому он неприменим для многомерного рюкзака. Однако следует отметить, что для задачи непрерывного рюкзака именно этот алгоритм находит наиболее оптимальное решение.

Генетический алгоритм является одним из самых быстрых алгоритмов. Но ограничением этого алгоритма является то, что его хромосомы кодируются дискретно. Соответственно, его нельзя использовать для решения непрерывных и бесконечных задач. Недостатком генетического алгоритма также является то, что он не гарантирует нахождение оптимального решения в некоторых ситуациях (находит локальный экстремум вместо глобального). Происходит это вследствие того, что алгоритм может заканчиваться не только при достижении оптимального решения, но и следующих условиях:

- пройдено максимальное заданное число итераций;
- прошло максимальное время, заданное для выполнения алгоритма;
- при переходе к новому поколению не происходит существенных изменений.

УДК 519

## **ЭВЕНТОЛОГИЧЕСКАЯ РЕГРЕССИЯ СЛУЧАЙНЫХ МНОЖЕСТВ СОБЫТИЙ В ВИДЕ СЕТ-СРЕДНИХ**

**А.И. Иванова**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук, доц. Д.В. Семенова**

*Сибирский федеральный университет*

Регрессия – это зависимость среднего значения какой-либо величины от некоторой другой величины или от нескольких величин. Если дано совместное распределение двух случайных множеств событий  $K$  и  $L$ , значения которых содержатся в конечных множествах  $\mathcal{X}$  и  $\mathcal{Y}$  соответственно, то регрессией  $K$  на  $L$  называется любой оператор  $\Psi(K)$ , приближенно представляющий статистическую зависимость  $L$  от  $K$ . Для определения зависимости между двумя случайными множествами событий в [1, 2] было предложено использовать эвентологическую рег-

рессию, которая устанавливает вид средней сет-функциональной зависимости между этими двумя случайными множествами событий.

*Случайное множество событий* под  $\mathfrak{X}$  – это измеримое отображение вероятностного пространства  $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$  в конечное измеримое пространство  $(2^{\mathfrak{X}}, 2^{2^{\mathfrak{X}}})$ , т. е.  $K: (\Omega, \mathfrak{F}, P) \rightarrow (2^{\mathfrak{X}}, 2^{2^{\mathfrak{X}}})$ , где  $\mathfrak{X} \subset \mathfrak{F}$  – конечное множество событий, избранных из алгебры  $\mathfrak{F}$  этого пространства. Вероятностное распределение *случайного множества событий*  $K$  под конечным множеством событий  $\mathfrak{X}$  можно представить несколькими эквивалентными распределениями вероятностей, порождённых этим множеством событий [1]:

эвентологическое распределение (Э-распределение) I-го рода случайного множества событий  $K$  под конечным множеством событий  $\mathfrak{X}$  – это набор из  $2^{|\mathfrak{X}|}$  вероятностей вида  $\{p(X // \mathfrak{X}), X \subseteq \mathfrak{X}\}$ , где  $p(X // \mathfrak{X}) = P(K = X) = P(\text{ter}(X // \mathfrak{X}))$ ;

$|\mathfrak{X}|$  – мощность множества  $\mathfrak{X}$ ; под  $\text{ter}(X // \mathfrak{X})$  понимаем террасное событие I-

го рода [1]  $\text{ter}(X // \mathfrak{X}) = \left( \bigcap_{x \in X} x \right) \cap \left( \bigcap_{x \in X^c} x^c \right)$ , которое наступает тогда, когда на-

ступают события  $x \in X$  и не наступают события  $x \in X^c = \mathfrak{X} - X$ .

- Э-распределение II-го рода случайного множества событий  $K$  под конечным множеством событий  $\mathfrak{X}$  – это набор из  $2^{|\mathfrak{X}|}$  вероятностей вида  $\{p_{X // \mathfrak{X}}, X \subseteq \mathfrak{X}\}$ , где  $p_{X // \mathfrak{X}} = P(X \subseteq K) = P(\text{ter}_{X // \mathfrak{X}})$ , где  $\text{ter}_{X // \mathfrak{X}}$  понимаем террасное событие II-го рода [1]:  $\text{ter}_{X // \mathfrak{X}} = \bigcap_{x \in X} x$ .

**Задача эвентологической регрессии.** Пусть задано совместное распределение двух случайных множеств событий  $K$  и  $L$ , значения которых содержатся в конечных множествах  $\mathfrak{X}$  и  $\mathfrak{Y}$  соответственно. Пусть  $\rho: 2^{\mathfrak{Y}} \rightarrow 2^{\mathfrak{Y}}$  – некоторая метрика в  $\mathfrak{Y}$ . Необходимо найти сет-функцию  $\varphi: 2^{\mathfrak{X}} \rightarrow 2^{\mathfrak{Y}}$ , которая доставляет минимум функционалу  $E\rho(L, \varphi(K))$ , где  $E$  – оператор математического ожидания.

Если в качестве метрики  $\rho: 2^{\mathfrak{Y}} \rightarrow 2^{\mathfrak{Y}}$  взять  $\alpha$ -симметричную метрику  $\rho_{\alpha}(X, Y) = \alpha |X \setminus Y| + (1 - \alpha) |Y \setminus X|$ , функция эвентологической регрессии имеет вид

$$Y = \varphi(X) = Q_{\alpha} \left( Y \Big|_{\text{ter}(X // \mathfrak{X})} \right), X \subseteq \mathfrak{X}, Y \subseteq \mathfrak{Y}$$

– условного сет-квантиля порядка  $\alpha$ , где  $Q_{\alpha} \left( Y \Big|_{\text{ter}(X // \mathfrak{X})} \right) = \left\{ y: P \left( Y \Big|_{\text{ter}(X // \mathfrak{X})} \right) \geq \alpha \right\}$ .

Совместное распределение двух случайных множеств событий  $K$  и  $L$ , значения которых содержатся в конечных множествах  $\mathfrak{X}$  и  $\mathfrak{Y}$  соответственно, можно представить в виде следующей таблицы размерности  $2^{|\mathfrak{X}|} \times 2^{|\mathfrak{Y}|}$ .

**Таблица 1.** Совместное распределение двух случайных множеств событий  $K$  под  $\mathfrak{X}$  и  $L$  под  $\mathfrak{Y}$

$\mathfrak{X} \backslash \mathfrak{Y}$	$ter(\emptyset // \mathfrak{Y})$	...	$ter(Y // \mathfrak{Y})$	...	$ter(\mathfrak{Y} // \mathfrak{Y})$	$P(K = X)$
$ter(\emptyset // \mathfrak{X})$	$P(ter(\emptyset // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$	...	$P(ter(Y // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$	...	$P(ter(\mathfrak{Y} // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$	$P(ter(\emptyset // \mathfrak{X}))$
...	...	...	...	...	...	...
$ter(X // \mathfrak{X})$	$P(ter(X // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$	...	$P(ter(X \cap Y // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$	...	$P(ter(X \cap Y // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$	$P(ter(X // \mathfrak{X}))$
...	...	...	...	...	...	...
$ter(\mathfrak{X} // \mathfrak{X})$	$P(\mathfrak{X} // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y})$		$P(ter(\mathfrak{X} \cap Y // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$		$P(ter(\mathfrak{X} \cap \mathfrak{Y} // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))$	$P(ter(\mathfrak{X} // \mathfrak{X}))$
$P(L = Y)$	$P(ter(\emptyset // \mathfrak{Y}))$	...	$P(ter(Y // \mathfrak{Y}))$	...	$P(ter(\mathfrak{Y} // \mathfrak{Y}))$	

Пользуясь табл. 1, можно рассчитать условные вероятности по формуле

$$P(Y|_{ter(X)}) = \frac{P(ter(X \cap Y // \mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}))}{P(ter(X // \mathfrak{X}))}$$

и найти:

- условный сет-квантиль  $Q_{\alpha}(Y|_{ter(X)}) = \{y : P(Y|_{ter(X)}) \geq \alpha\}$ ;
- условную сет-медиану  $Med(Y|_{ter(X)}) = \left\{y : P(Y|_{ter(X)}) \geq \frac{1}{2}\right\}$ ;
- условную сет-моду  $P(Y|_{ter(X)}) = Mod(Y|_{ter(X)}) = \max_{X \subseteq \mathfrak{X}} P(Y|_{ter(X)} = X)$ .

Рассмотрим пример «Выпить - Закусить». Имеется статистика чеков заказов за 9 дней. Разобьем исходный ассортимент на два множества. Пусть  $\mathfrak{X} = \{x, y, z, l\}$  – множество «Закусить», а  $\mathfrak{Y} = \{a, b, c, d, e\}$  – множество «Выпить». Пусть случайное множество событий  $K$  задано под  $\mathfrak{X}$ .  $K$  можно трактовать как набор заказанных блюд случайным покупателем. Пусть случайное множество событий  $L$  задано под  $\mathfrak{Y}$  и трактуется как набор заказанных напитков случайным покупателем. Из имеющихся заказов была получена оценка совместного распределения  $K$  и  $L$ . Построим сет-регрессии  $K$  на  $L$  в виде сет-квантиля, сет-моды, сет-медианы. На рис. 1 представлена диаграмма Эйлера – Венна для множества событий  $\mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}$ . По вертикали – события-терраски  $ter(Y // \mathfrak{Y})$ ,  $Y \subseteq \mathfrak{Y}$ ; по горизонтали – события-терраски  $ter(X // \mathfrak{X})$ ,  $X \subseteq \mathfrak{X}$ ; красными квадратами показан полученный график сет-функции эвентологической регрессии  $Y = \varphi(X) = Q_{\alpha}(Y|_{ter(X)})$ ,  $X \subseteq \mathfrak{X}$ ,  $Y \subseteq \mathfrak{Y}$ , при  $\alpha = 4/7$ .

На рис. 2, 3 представлены сет-мода и сет-медиана для примера «Выпить – Закусить».

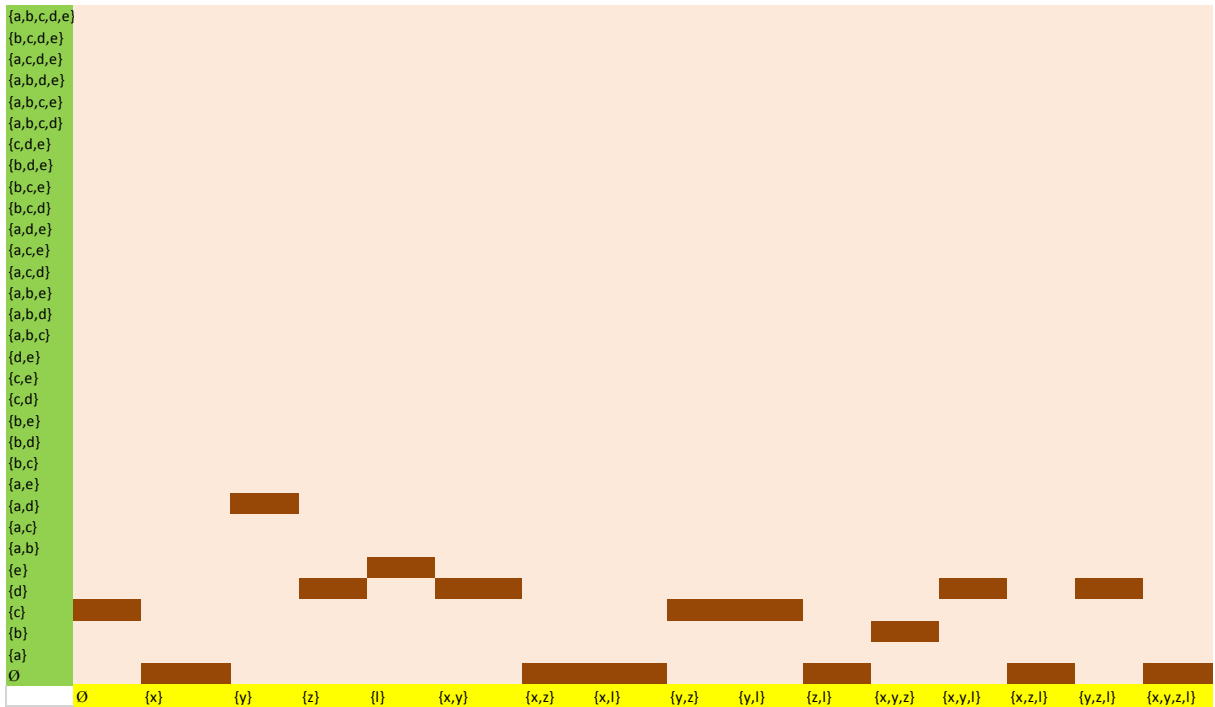


Рис. 1. Диаграмма Эйлера – Венна для множества событий  $\mathfrak{X} \cup \mathfrak{Y}$ . По вертикали – события-терраски  $ter(Y // \mathfrak{Y}) = \{u : u \in Y\}$ ,  $Y \subseteq \mathfrak{Y}$ ; по горизонтали – события-терраски  $ter(X // \mathfrak{X}) = \{x : x \in X\}$ ,  $X \subseteq \mathfrak{X}$ ; красными квадратами показан полученный график сет-функции эвентологической регрессии  $Y = \phi(X)$ ,  $X \subseteq \mathfrak{X}$ ,  $Y \subseteq \mathfrak{Y}$

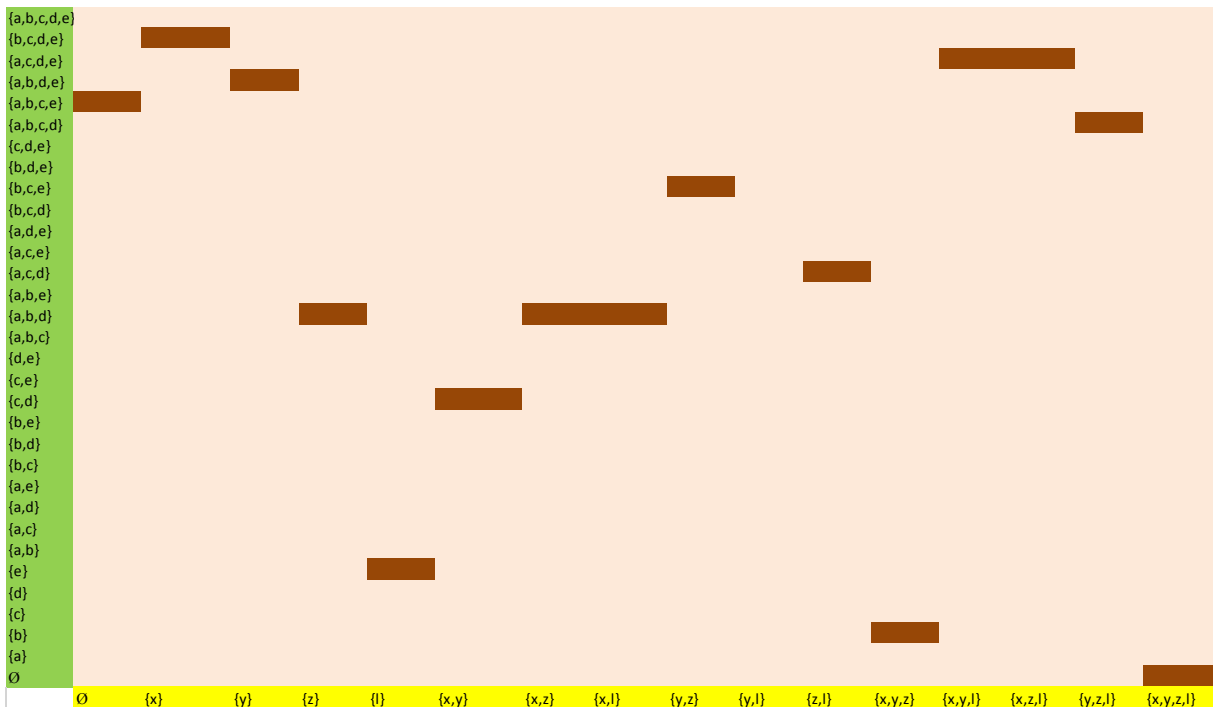


Рис. 2. Сет-медиана для примера «Выпить – закусить»



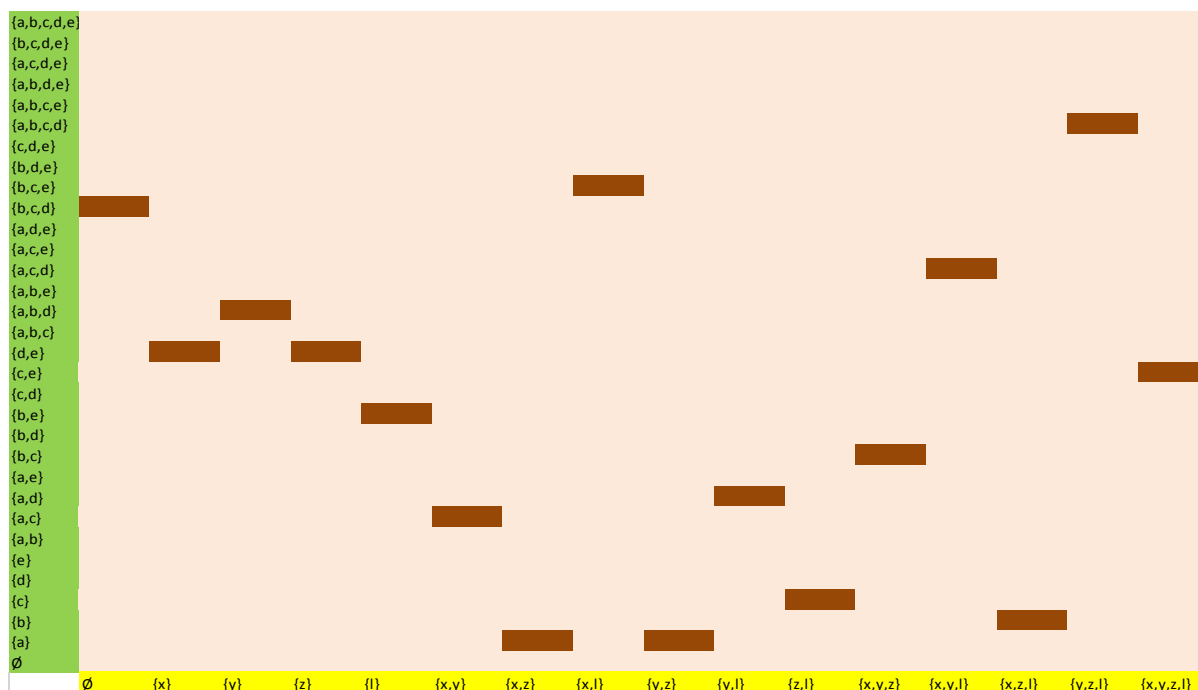


Рис. 3. Сет-модель для примера «Выпить – закусить»

Эвентологическая регрессия может быть использована для решения задач моделирования, прогнозирования и контроля развития статистических систем природы и общества, события в которых, как правило, представлены неколичественной информацией.

## МЕДИЦИНСКАЯ БИОЛОГИЯ

УДК 577.1: 616-093/-098

### ВЛИЯНИЕ ЦИТОФЛАВИНА НА ПРО/АНТИОКСИДАНТНУЮ СИСТЕМЫ В ЭРИТРОЦИТАХ БОЛЬНЫХ ЭХИНОКОККОЗОМ

**Е.В. Алымова**

**Научный руководитель проф., канд. биол. наук Н.М. Титова**

*Сибирский федеральный университет*

Редокс-гомеостаз в организме человека поддерживается за счет динамического равновесия между прооксидантной и антиоксидантной системами. Окислительные процессы, протекающие при участии монооксигеназ, оксидоредуктаз со-

проводятся образованием активных форм кислорода (АФК), таких как супероксид анион-радикал, пероксид водорода, гидроксильный радикал, синглетный кислород. Стационарный уровень АФК поддерживают ферментативное и неферментативное звенья антиоксидантной системы (АОС), которые включаются в работу последовательно, взаимно дополняя друг друга, обеспечивая контроль окислительных реакций и инактивацию всего многообразия токсичных продуктов. АФК являются основными биологическими субстратами АОС.

При физиологических концентрациях АФК способны регулировать важнейшие биологические процессы в клетках: митогенную активность, регуляцию генной экспрессии. Однако при избыточных концентрациях АФК могут приводить к окислительной модификации и инактивации различных ферментов и структурных белков, повреждению клеточных мембран посредством активации перекисного окисления липидов и гликозилирования белков, вызывать структурные повреждения ДНК, способствуя возникновению генных мутаций. Именно благодаря антиоксидантной системе осуществляется поддержание окислительных процессов на уровне, необходимом для нормальных физиологических функций организма.

Эхинококкоз – это паразитарное заболевание, которое вызывается *Echinococcus granulosus* и является весьма опасным для человека и животных. Заболевание может поражать жизненно важные органы, такие как печень, легкие, мозг. Эхинококкоз печени (ЭП) вызывает глубокие изменения гепатоцитов, степень которых варьирует от незначительных нарушений вплоть до цирроза печени. При данной патологии могут нарушаться метаболические процессы, развиваться аллергия, а так же проявляться окислительный стресс, обусловленный чрезмерным образованием активных форм кислорода. Согласно современным исследованиям эхинококкоз является свободно-радикальной патологией (СРП). При лечении СРП используются препараты, обладающие антиоксидантным действием, одним из них является цитофлавин.

Цитофлавин представляет собой смесь веществ, играющих важную роль в обменных и окислительно-восстановительных процессах организма, и включает янтарную кислоту, рибоксин, никотинамид, моноклеотид рибофлавина. Широкое использование цитофлавина обусловлено большим количеством метаболических воздействий: улучшением дыхания и энергообразования в клетках, процессов утилизации кислорода тканями, восстановлением активности ферментов антиоксидантной защиты, активацией внутриклеточного синтеза белка. В связи с немногочисленными и неполными исследованиями редокс-гомеостаза при эхинококкозе целью данной работы явилось изучение состояния АОС у больных эхинококкозом до и после приема препарата цитофлавин.

**Материалы и методы.** Материалом исследования служили эритроциты практически здоровых людей, больных хроническим эхинококкозом, принимавших немозол, и больных, прошедших курс лечения цитофлавином. Диагноз у больных устанавливался на основании клинико-лабораторных данных и результатов ультразвукового исследования врачами ККБ № 1. Забор крови производили из локтевой вены, утром натощак, в качестве антикоагулянта использовали гепарин,

затем кровь центрифугировали при 1700g, плазма отбрасывалась. Оставшуюся эритроцитарную массу трижды отмыли физиологическим раствором (0,9 %-ным NaCl) и центрифугировали по 15 мин при 1700g. Последнее центрифугирование проводили в течение 20 мин для более плотной упаковки клеток.

В эритроцитах определяли активность супероксиддисмутазы (SOD), каталазы (CAT), глутатионпероксидазы (GPO), глутатион-S-трансферазы (GST), содержание восстановленного глутатиона (GSH). О состоянии свободнорадикального окисления липидов судили по количеству вторичного продукта перекисного окисления липидов (ПОЛ) – малонового диальдегида (MDA).

### Результаты и их обсуждение

В таблице приведены содержание MDA, GSH и активность ферментов АОС.

**Таблица**

Показатель	Контроль (n=26)		Больные (базисная терапия) (n=12)		Больные (базисная терапия + цитофлавин) (n=17)	
	Me	C <sub>25</sub> –C <sub>75</sub>	Me	C <sub>25</sub> –C <sub>75</sub>	Me	C <sub>25</sub> –C <sub>75</sub>
MDA, мкмоль/г Hb	1,72	1,44–2,46	6,30 p <sub>1</sub> <0,001	5,63–7,00	5,47 p <sub>1</sub> <0,001 p <sub>2</sub> <0,005	4,50–7,30
SOD, у.е./мин.*г Hb	1508	1248–1632	1372 p <sub>1</sub> <0,001	1008–1430	1672 p <sub>1</sub> <0,001 p <sub>2</sub> <0,005	1344–1768
Каталаза, ммоль/мин.*гHb	286	247–327	223 p <sub>1</sub> <0,001	205–234	213 p <sub>1,2</sub> <0,001	187–230
GPO, мкмоль/мин.*гHb	77,2	66,8–101,0	80,5	69,5–100,3	88,8	69,9–95,0
GSH, мкмоль/гHb	2,32	1,64–3,00	1,77 p <sub>1</sub> <0,005	1,33–4,52	1,68 p <sub>1,2</sub> <0,005	1,24–2,17
GST, ммоль/мин./гHb	2,34	2,22–2,83	1,55 p <sub>1</sub> <0,005	1,26–2,24	2,20 p <sub>1</sub> <0,005 p <sub>2</sub> <0,001	1,82–2,58

*Примечание: 1 – достоверность по сравнению с контролем, 2 – по сравнению с пациентами, получавшими базисную терапию.*

У больных эхинококкозом уровень MDA превышен в 3,7 раза по сравнению с аналогичным показателем у здоровых людей, что может служить косвенным подтверждением увеличения уровня активных форм кислорода, запускающих не только процессы ПОЛ, но и окислительной модификации других биомолекул. Отмечается снижение активности ферментов, устраняющих супероксидный анион-радикал и пероксид водорода – SOD, CAT, а также GST, участвующего в детокси-

кации экзо- и эндоксенобиотиков, степень снижения различна: 10 %, 22 % и 34 % соответственно. После лечения препаратом цитофлавин состояние перекисного окисления и активность антиоксидантных ферментов несколько изменилась. Произошло незначительное, но достоверное снижение уровня MDA – на 13 % по сравнению с показателем MDA у больных эхинококкозом при базисной терапии. Активность супероксиддисмутазы и глутатион-S-трансферазы достоверно превысила на 22 % и 42 % соответственно показатели у больных, принимавших немозол, активность каталазы осталась по-прежнему сниженной по сравнению с контролем.

УДК 61:575

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ЧАСТИЧНЫХ МИКРОДЕЛЕЦИЙ AZFc-ЛОКУСА Y-ХРОМОСОМЫ В ПОПУЛЯЦИИ МУЖЧИН ГОРОДА КЕМЕРОВО**

**Я.И. Перепечай**

**Научный руководитель канд. биол. наук Е.В. Маркова**

*Сибирский федеральный университет*

*Красноярский центр репродуктивной медицины (КЦРМ)*

В настоящее время многими исследователями сообщается о снижении фертильности мужчин во всем мире. Также наблюдается тенденция ослабления норм фертильного эякулята. В 2010 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) внесла изменения в референсные значения показателей эякулята. Согласно этому протоколу объем эякулята, принимаемый за норму, снизился с 2 мл в 1999 г. до 1,5 мл, минимальные показатели концентрации сперматозоидов, принимаемой за норму, снизились с 20 млн/мл до 15 млн/мл.

Нарушения сперматогенеза могут быть обусловлены различными причинами, среди которых важную роль играют генетические дефекты. На сегодняшний день выявлено много генетических факторов мужского бесплодия: количественные и качественные аномалии кариотипа и генные нарушения. Считается, что в 7–30 % случаев причиной необструктивной азооспермии и тяжелой олигозооспермии являются делеции эухроматинового района длинного плеча Y-хромосомы (Yq11). Роль частичных микроделекций AZFc локуса Y-хромосомы пока до конца не установлена. Хотя частичные AZFc-микроделекции могут быть найдены и у здоровых мужчин, с большей частотой они обнаруживаются у пациентов с нарушением сперматогенеза. Большинство исследователей ассоциируют данный тип делеций со снижением фертильности мужчины. Выделяют несколько типов частичных AZFc-микроделекций: gr/gr, b2/b3, b1/b3.

Большой интерес представляют популяционные исследования распространенности частичных микроделений Y-хромосомы, с целью выявления их вклада в потенциальную фертильность мужчин, проживающих на той или иной территории. До настоящего времени исследования распространенности частичных микроделений *AZFc*-локуса Y-хромосомы в Сибирском регионе не проводились.

Целью данной работы являлось исследование частоты частичных микроделений *AZFc*-локуса Y-хромосомы в популяции мужчин, проживающих в г. Кемерово.

### Материалы и методы

Набор клинического материала проводился на базе Института цитологии и генетики СО РАН г. Новосибирска. Объектом исследования были 268 молодых мужчин, не имеющих детей и не знающих свой репродуктивный статус, проживающих в г. Кемерово не менее пяти лет. У каждого испытуемого брали венозную кровь, из которой выделяли ДНК методом фенол-хлороформной экстракции.

Анализ частичных микроделений *AZFc*-локуса Y-хромосомы проводили в два этапа. На первом этапе исследовались локусы *sY1191* и *sY1291*, а так же гены *AMG* и *SRY* для идентификации пола. На втором этапе проводилось исследование локусов *sY142*, *sY1161*, *sY1197*, *sY1201*, *sY1206*, *sY1258* для тех мужчин, у которых были выявлены делеции локусов *sY1191* и/или *sY1291* на первом этапе. При постановке ПЦР использовали положительные и отрицательные контроли. Положительный контроль – образец ДНК, дающий в ПЦР известный результат. В качестве отрицательного контроля, не содержащего ДНК, использовали деионизированную воду.

Детекцию ПЦР-продуктов проводили в 7 %-ном полиакриламидном геле в присутствии маркера молекулярного веса *pUC19/MspI*. Окрашенные красителем *GelRed* гели просматривали с помощью гель-документирующей системы *GelDoc (BioRad)*.

О наличии делеции конкретного локуса судили по отсутствию ПЦР-продукта в двух повторностях. Достоверность различий между частотами оценивали по методу хи-квадрат в программе «Статистика».

### Результаты и их обсуждение

Анализ генов *AMG* и *SRY* подтвердил мужской пол всех исследуемых образцов ДНК.

Среди 263 обследованных мужчин частичные микроделения локуса *AZFc* были обнаружены у 11 человек, что составило 4,18 %. Наш результат близок к данным, полученным другими учеными для групп фертильных мужчин – 6 % и субфертильных мужчин – 3,7 %.

В структуре частичных микроделений наиболее часто встречались *gr/gr*-делении (45,45 %) и *b2/b3* (45,45 %), в 9,09 % случаев наблюдались *b1/b3*-делении (рис. 1).

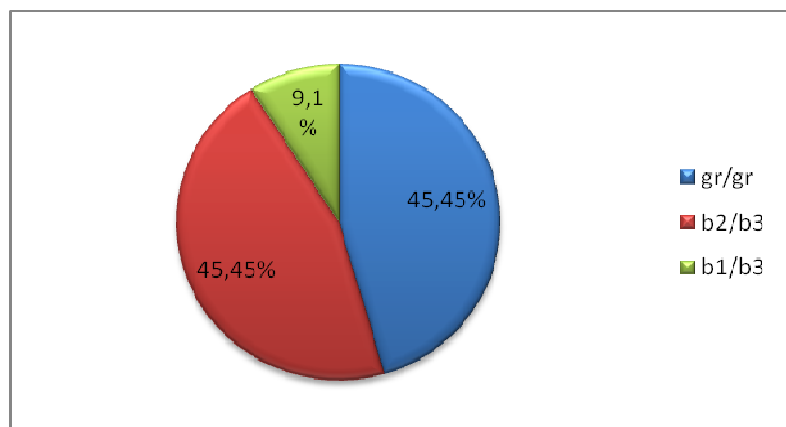


Рис. 1. Частота встречаемости отдельных типов частичных *AZF*c-микроделеций в популяции г. Кемерово

В нашем исследовании *gr/gr*-делеции были обнаружены у 5 человек, что составляет 1,9 %, *b2/b3* также выявлены у 1,9 %, а *b1/b3*-делеция детектирована у 1 человека (0,38 %).

В табл. 1 приведен сравнительный анализ полученных нами результатов с данными литературы.

**Таблица 1.** Распространенность различных типов частичных *AZF*c-делеций по данным разных исследований

Исследование		№	Частота <i>AZF</i> c-делеции		
авторы	группы		gr/gr	b2/b3	b1/b3
Noordam et al, 2011	субфертильные мужчины	840	2,62 %	0,48 % p = 0,02	0,12 %
Giachini et al, 2005	патоспермия	150	5,33 % p = 0,04	1,30 %	0 %
	нормоспермия	189	0,53 %	0,50 %	0 %
Исламова, 2007	патозооспермия	125	19 % p < 0,001	2 %	0 %
	фертильные	304	17 % p < 0,001	0,30 %	0 %
Ho-su Sin et al, 2010	азооспермия	254	35,04 % p < 0,001	н/д	н/д
	олигозооспермия	141	28,37 % p < 0,001	н/д	н/д
	фертильные с нормозооспермией	377	3,45 %	н/д	н/д
Hucklenbroich et al, 2005	патозооспермия	348	4,02 %	0,57 %	0,29 %
	нормазооспермия	170	1,77 %	2,94 %	0,59 %
Наши результаты г. Кемерово	мужчины с неустановленной фертильностью	263	1,90 %	1,90 %	0,38 %

*p* – достоверность различий частоты *AZF*c-микроделеций в популяции г. Кемерово от литературных данных; н/д – нет данных.

Сравнение полученных нами данных с данными литературы показывает, что распространенность gr/gr-делеций в популяции города Кемерово не отличается от аналогичных показателей при нормозооспермии и субфертильности. Исключение составляют данные Исламовой, которые демонстрируют высокую частоту субмикроделеций (17 %) в группе фертильных мужчин. Частота gr/gr-делеций нашей группы мужчин с частотой в группах ниже, чем аналогичный показатель в группах с нарушениями сперматогенеза.

Встречаемость b2/b3-микроделеций у исследуемых нами мужчин не отличалась от большинства частот, представленных различными исследователями для контрольных групп и групп с патоспермией. Распространенность b1/b3-делеций в нашем исследовании также не имела достоверных отличий как от групп контроля, так и от пациентов с патозооспермией.

### **Выводы**

1. Частичные микроделеции AZFc-локуса Y-хромосомы были обнаружены у 4,18 % мужчин города Кемерово.
2. В структуре частичных микроделеций AZFc-локуса gr/gr- и b2/b3-делеции составили по 45,5 %, b1/b3 – 9,09 %.

УДК 616.71-081-018.46-002-036.12-089:541.41-092.9

## **ПРИМЕНЕНИЕ БИОДЕГРАДИРУЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ КОСТНЫХ ПОЛОСТЕЙ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ОСТЕОМИЕЛИТЕ**

**Н.М. Маркелова, А.А. Шумилова, А.П. Зуев, Е.С. Черепанова**

*Красноярский государственный медицинский университет имени  
проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого  
Сибирский федеральный университет*

### **Введение**

Проблема лечения хронического остеомиелита находится в центре внимания хирургов и травматологов и не теряет своей актуальности на протяжении многих лет. В структуре гнойной хирургической патологии на долю остеомиелита приходится от 3 до 10 %. Одной из основных проблем лечения хронического остеомиелита является выбор способа пластического замещения костного дефекта. Такие методы, как мышечная, кожно-фасциальная пластика, пломбирование полости синтетическими материалами, не приводят к полному восстановлению анатомической и функциональной целостности кости.

Особенный интерес в этом плане представляют биodeградируемые микробиологического происхождения – полигидроксиалканоаты (ПГА), которые обла-

дают рядом свойств: совместимостью с животными тканями, высокой механической прочностью, пьезоэлектрическим эффектом, что делает их перспективными материалами для применения в медицине, включая травматологию. Работами коллектива лаборатории хемоавтотрофного биосинтеза в культуре клеток остеобластического ряда и на модели сегментарной остеотомии у лабораторных животных показано, что ПГА и его композиции с гидроксиапатитом обладают выраженными остеопластическими свойствами, медленно и адекватно росту костной ткани деградируют *in vivo*, обеспечивая нормальное протекание репаративного остеогенеза.

Цель исследования: экспериментально обосновать возможность использования биополимеров – ПГА – в комплексном лечении хронического остеомиелита.

### **Материалы и методы исследования.**

Работа выполнена в экспериментальной лаборатории кафедры общей хирургии КрасГМУ им. проф. В. Ф. Войно-Ясенецкого в период с 2009 по 2011 гг. В исследование включены 60 кроликов-самцов породы «Шиншилла» 4–5-месячного возраста. Распределение животных по сериям представлено в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристика экспериментальных групп животных

Номер группы	Характеристика группы	Кол-во животных
1-я группа - сравнения	Модель хронического остеомиелита, пластика полости аутокостью	20
2-я группа - исследуемая	Модель хронического остеомиелита, пластика остеомиелитического дефекта пломбировочным материалом из ПГА	20
3-я группа - исследуемая	Модель хронического остеомиелита, пластика остеомиелитического дефекта пломбировочным материалом из ПГА в комбинации с препаратом Тиенам	20

Исследованы экспериментальные объемные имплантаты, изготовленные из непосредственно полигидроксibuтирата (ПГБ), в виде пломбировочного материала, представляющего собой порошок ПГБ и смесь ПГБ с тиенамом. Имплантаты из ПГА синтезировали одним из разработанных способов в Институте биофизики СО РАН.

Костный дефект в первой исследуемой группе заполняли пломбировочным порошком из ПГА, второй – имплантатом, на основе ПГА и антибактериального препарата группы карбапенемов (тиенам) в сочетании 10:1, в группе сравнения – костным аутоотрасплантантом.

Проводили сравнительный анализ рентгенографических данных на 30-е, 90-е сутки после пластики костной полости. Оценивали размеры костного дефекта, его форму, однородность структуры регенерата, состояние надкостницы, кортикальной пластины и костномозгового канала.

Выведение животных из эксперимента и забор материала осуществлялся на 30-е, 90-е сутки наблюдения. На аутопсии оценивали состояние окружающих мяг-



ких тканей, состояние надкостницы, кортикального слоя и костномозгового канала. В области дефекта проводили бактериологический посев на среду Чистовича (желточно-солевой агар). Результаты оценивали на 2-е – 4-е сутки.

### Результаты и обсуждение

В раннем послеоперационном периоде (до 3 суток) животные всех исследуемых групп оставались вялыми, мало двигались, щадили оперированную конечность. Аппетит и двигательная активность кроликов восстанавливалась к 3–5-м суткам. На 5–12-е сутки после операции у 19 животных группы сравнения выявлен отек мягких тканей в области операции, у 12 – локальная гиперемия кожи, в первой исследуемой группе эти явления отмечены у 13 и 9 животных соответственно, во второй исследуемой группе – у 8 и 5 животных. Опорная функция конечности восстанавливалась в группе сравнения на  $5,56 \pm 1,2$  сутки после операции, в 1-й и 2-й исследуемых группах – на  $4,97 \pm 0,8$  и  $4,28 \pm 0,9^*$  соответственно. Летальных случаев в послеоперационном периоде не наблюдали.

Анализ рентгенографических данных оперированных конечностей животных выявил следующее: на 30-е сутки после применения для пластики дефекта ПГБ и ПГБ/тиенам в проекции костного дефекта определены участки просветления округлой формы с четкими границами, с облачковидным затемнением в центре. На 90-е сутки у животных первой и второй исследуемых групп рентгенологически подтверждалось восстановление анатомической структуры кости. В группе сравнения в эти сроки сохранялась неоднородность структуры регенерата и утолщение надкостницы.

При исследовании микробного профиля группы сравнения на 30-е и на 90-е сутки высевались ассоциации микробов преимущественно в 48,2 % *Staphylococcus aureus*, в 55,9 % ассоциации грамм + и анаэробных микроорганизмов, *E. Coli* (табл. 2).

**Таблица 2**

Группы экспериментальных животных	30-е сутки послеоперационного периода	90-е сутки послеоперационного периода
Группа сравнения	$6,4 \times 10^7 \pm 110$ в 1 г <i>Staph. aureus</i> $4,4 \times 10^7 \pm 110$ в 1 г ассоциации грамм (+) и (–) анаэробных микроорганизмов, <i>E. Coli</i>	$3,2 \times 10^4 \pm 150$ в 1 г <i>Staphylococcus aureus</i> $2,8 \times 10^4 \pm 150$ в 1 г ассоциации грамм (+) и (–) анаэробных микроорганизмов, <i>E. Coli</i>
Первая исследуемая группа	$4,2 \times 10^4 \pm 150$ в 1 г <i>Staph. aureus</i> $4 \times 10^4 \pm 150$ в 1 ассоц. грамм (+) и (–) анаэробных микроорганизмов, <i>E. Coli</i>	Нет роста
Вторая исследуемая группа	Нет роста	Нет роста

В первой исследуемой группе животных на 30 сутки высевались ассоциации микробов преимущественно в 44,1 % *Staphylococcus aureus*, в 51,8 % – ассоциации грамм + и анаэробных микроорганизмов, *E. Coli*, на 90 сутки результаты бактериоскопических исследований были отрицательными. В третьей группе животных на 30-е и 90-е сутки при бактериоскопическом исследовании микробы не высевались. Полное восстановление анатомической структуры костной ткани наблюдали во второй исследуемой группе животных. В группе сравнения полноценного восстановления костной структуры не наблюдали, сохранялись явления воспаления и распространения инфекционного процесса.

При гистологическом исследовании препаратов первой и второй исследуемой группы с ПГБ и ПГБ/тиенам на 30-е сутки дефект в центре был заполнен грубоволокнистой соединительной тканью с выраженной перифокальной пролиферацией капиллярного типа сосудов, очаговой лимфогистиоцитарной инфильтрацией (рис. 2). Преимущественно вокруг новообразованных сосудов отмечены очаги примитивного остеогенеза с формированием остеодноподобных масс, а также костных балок с нарушенной архитектоникой, хаотичным расположением остецитов. Зона остеогенеза характеризовалась выраженной базофилией клеток и остеомукоида развивающейся костной ткани.

В группе сравнения в эти сроки дефект был заполнен рыхлой соединительной тканью с участками грануляционной и фибро-ретикулярной ткани и остатками детрита. Отмечена выраженная лейкоцитарная инфильтрация регенерата, гиперемия кровеносных сосудов со стазом форменных элементов крови, периваскулярный отек, сосудистая сеть была слабо выражена.

При гистологическом исследовании на 60-е сутки микроскопический дефект в экспериментальной группе ПГБ/тиенам был представлен сетью переплетающихся костных перекладин различной степени зрелости. Наблюдали явления активной перестройки грубоволокнистой костной ткани в пластинчатую кость. В группе сравнения наблюдали снижение темпов регенерации. В центре дефекта сохранялись прослойки плотной неоформленной соединительной ткани с чрезмерным отложением коллагеновых волокон, что создавало механический барьер на пути роста хрящевой и костной ткани. На границе рубцовой и костной ткани наблюдались очаги активно пролиферирующего хряща.

На 90-е сутки во всех препаратах 1-й и 2-й исследуемых групп наблюдали признаки, указывающие на восстановление целостности костной структуры. Надкостница полностью моделирована, состояла из наружного и внутреннего слоев. Костная ткань различной степени зрелости, пластинчатого строения, расположение остеонов нерегулярное, увеличивалось количество зрелых фиброцитов и остецитов. Промежуточное вещество становилось оптически более плотным и гомогенным. В группе сравнения на 90-е сутки область дефекта определялась по сужению костной ткани в месте операции. Кортикальная пластинка сужена, клетки малочисленны, в межбалочных пространствах сосуды синусоидного типа, костномозговой канал либо резко сужен, либо закрыт замыкательной пластинкой.

### **Заключение**

Таким образом, пломбировочный материал порошковообразного ПГА и смеси ПГБ/тиенам пригоден для пластики костных полостей, инфицированных *Staphylococcus aureus*, обладает выраженными остеопластическими свойствами, медленно деградирует *invivo*, обеспечивая нормальное протекание репаративного остеогенеза. Результаты позволяют рекомендовать ПГА в качестве костнопластического материала для восстановления дефектов костной ткани и требуют дальнейшего изучения.

## **НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ**

УДК 001.31

### **МОДИФИЦИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМОРАСПАДЕ АЦЕТИЛАЦЕТОНАТОВ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ**

**А.Е. Афанасьева, Н.В. Жарикова**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук В.П. Исаков**

*Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
Сибирский федеральный университет*

Термораспад металлоорганических соединений с образованием неорганических твердых тел из паровой фазы изучается уже в течение многих лет (в литературе его называют метод *MOCVD*). В данной работе рассматривается только распад ацетилацетонатов металлов. В настоящее время этот метод широко используется в материаловедении для получения металлических и металлосодержащих наночастиц, осажденных на разные материалы. Основное достоинство данного метода – возможность получать различные наноматериалы при относительно низких температурах. Метод требует использования летучих соединений металлов, которые при термораспаде разлагаются на твердофазные неорганические соединения и летучую органическую часть. Схема термического распада летучих ацетилацетонатов металлов ( $\text{Me}(\text{acac})_n$ ) приведена на рис. 1.

При получении композиционных материалов *CVD*-методом разложение осуществляется на поверхности летучей соли металла, нагретой до температуры, необходимой для термического распада. Процесс требует использования достаточно сложной аппаратуры (проточные реакторы, вакуумная аппаратура).

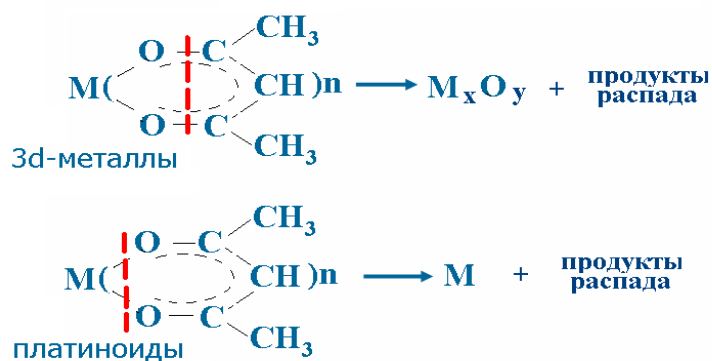


Рис. 1. Схемы термораспада летучих ацетилацетонатов металлов ( $\text{Me}(\text{acac})_n$ ) в инертной среде

В данной работе в основе метода модифицирования поверхности углеродных наноматериалов наноразмерными частицами платины и палладия лежат термические реакции наноуглерода и летучего ацетилацетоната металла, которые осуществляются нагреванием на воздухе свободно насыпанных порошковых смесей реагентов. Ранее в работах В. Г. Исаковой и В. П. Исакова было показано, что нагревание твердофазных порошковых смесей углеродных наноматериалов с летучими ацетилацетонатами переходных металлов на воздухе протекает с самовозгоранием и последующим горением порошков в режиме тления.

Горение является следствием термораспада летучего комплекса металла и экзотермической реакции окисления органического лиганда. В зависимости от вида металла конденсированными продуктами горения комплексов металлов являются наноразмерные частицы металла либо оксида металла.

Исследование состава и морфологии продуктов, образующихся в реакции горения порошков углеродных наноматериалов с ацетилацетонатами платины и палладия в зависимости от соотношения углеродных наноматериалов и соли металла в исходной смеси порошки углеродных наноматериалов и ацетилацетонаты Pt и Pd смешивали, помещали в открытый тигель и нагревали до самовозгорания. При температуре 160–180 °С наблюдалось начало самовозгорания порошковой смеси, далее реакция протекала в режиме тления при температуре  $\approx 230$  °С.

ДНА были синтезированы взрывной технологией и выделены из шихты с использованием процесса сжигания «неалмазной» фракции, горение было инициировано введением  $\text{Fe}(\text{acac})_3$  в алмазосодержащую шихту. На рис. 2 и 3 представлены дифрактограммы продуктов термических реакций углеродных наноматериалов с  $\text{Pt}(\text{acac})_2$  и с  $\text{Pd}(\text{acac})_2$  соответственно.

Размер частиц платины уменьшается с уменьшением содержания платины в используемых материалах. На дифрактограммах продуктов горения  $\text{Pt}(\text{acac})_2$  с ДНА, начиная с  $\theta \approx 40^\circ$ , помимо пиков, соответствующих наноуглероду, наблюдаются только рефлексы, отвечающие гранецентрированной кубической решетке (ГЦК) металлической платины.

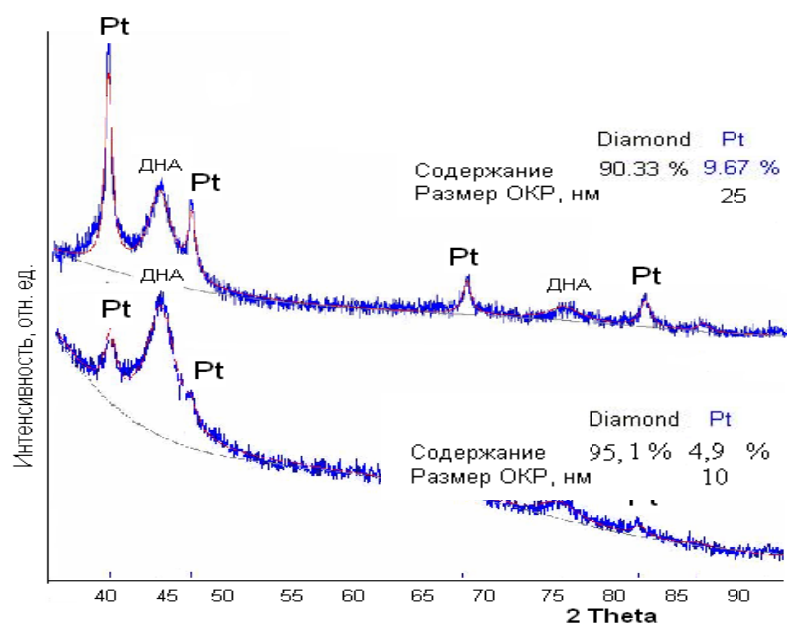
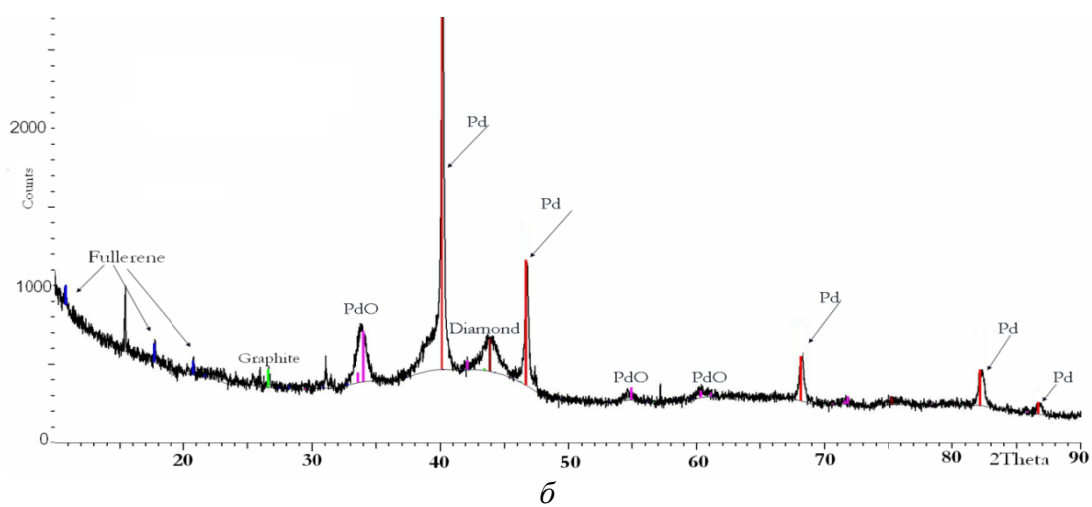
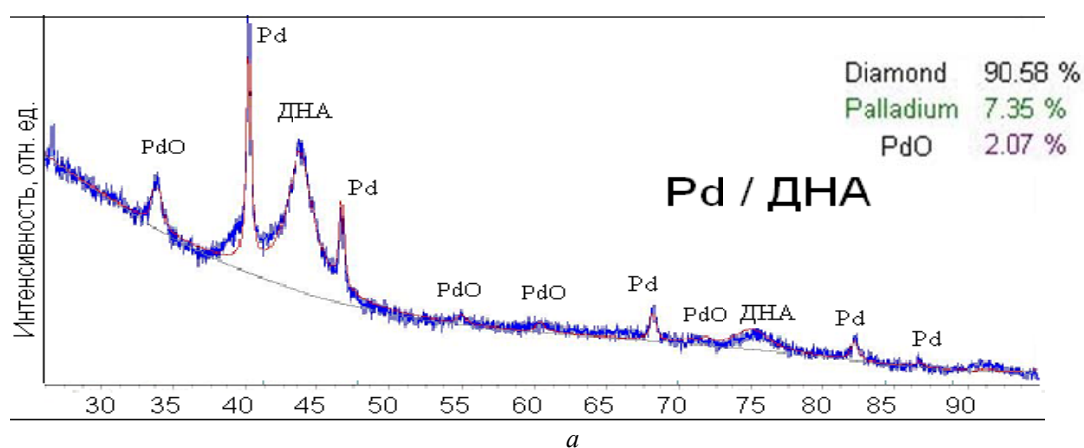


Рис. 2. Дифрактограмма продуктов термических реакций углеродных наноматериалов с  $Pt(acac)_2$ , дифрактометр BrukerD8 Advance



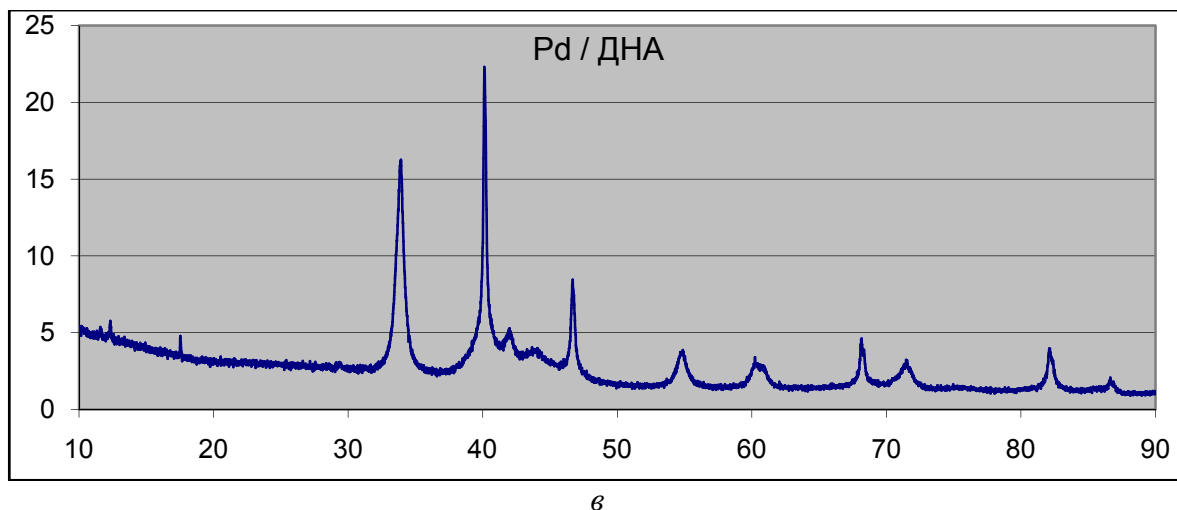


Рис. 3. Дифрактограммы продуктов термических реакций углеродных наноматериалов с  $\text{Pd}(\text{acac})_2$ , дифрактометр BrukerD8 Advance: а – содержание Pd 7,35 %, б – содержание Pd 20 % от массы ДНА, в – содержание Pd 20 % от массы ДНА

На дифрактограммах продуктов реакций  $\text{Pd}(\text{acac})_2$  с ДНА присутствуют рефлексы соответствующие Pd и PdO при углах выше  $30^\circ$  (рис. 3, а). Возможно, в силу более высокой реакционной способности Pd, происходит его частичное окисление. Также на дифрактограммах можно увидеть рефлексы, соответствующие фуллеренам. Эксперименты показали, что их интенсивность меняется в зависимости от концентрации Pd и температурного режима реакции. Рисунок 3, б соответствует более высокому температурному режиму ( $t \sim 200\text{--}250^\circ\text{C}$ ), а рисунок 3, в – более низкому ( $t \sim 180\text{--}230^\circ\text{C}$ ). Исходя из этих данных можно увидеть, что интенсивность рефлексов выше для температуры  $200\text{--}250^\circ\text{C}$ . Таким образом, для получения более точной информации относительно образования фуллеренов необходимо провести исследования с разным содержанием Pd и при разных температурных режимах.

УДК 666.233

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА КОАГУЛЯЦИЮ ГИДРОЗОЛЕЙ НАНОАЛМАЗОВ

Е.Ю. Государева

Научный руководитель д-р. техн. наук Г.А. Чиганова

Сибирский федеральный университет

Исследование закономерностей коагуляции гидрозолей наноматериалов актуально как для многочисленных путей применения их агрегативно устойчивых дисперсий, так и для осуществления их отделения от дисперсионной среды при концентрировании и очистке технологических жидкостей.

Для непосредственного изучения коагуляции применяют методы, позволяющие проводить измерения числа частиц и его изменение в ходе коагуляции. Для наночастиц же широкое распространение получила косвенная оценка скорости коагуляции, основанная на наблюдении за изменением дисперсности по изменению оптической плотности или мутности коагулирующей системы. В данной работе для измерения оптической плотности водных суспензий наноалмазов использовался спектрофотометр КФК-ЗКМ.

Объектом исследования в данной работе являются 0,1 %-ные водные суспензии наноалмазов, полученные ультразвуковой обработкой в течение 3 минут озвучивания. Диспергирование проводилось на источнике стержневого типа УЗДН-А с частотой 22 кГц.

Наноалмазы получены методом детонационного синтеза – детонационные наноалмазы (далее – ДНА). Исследовалась технологическая партия наноалмазов, очищенных от неалмазного углерода термообработкой на воздухе в присутствии борного ангидрида  $B_2O_3$  и произведенных на совместном участке КНЦ СО РАН и СФУ. Ранее было показано, что подобные золи в отсутствие электролитов седиментационно устойчивы в течение длительного времени. Среднечисленный размер частиц или их прочных агрегатов в водной среде составляет 13 нм, размеры основного количества частиц находятся в диапазоне 10–100 нм (дисковая центрифуга CPS 24 000).

Оптическую плотность суспензий измеряли при длине света, равной 330 нм. В качестве раствора сравнения использовалась дистиллированная вода.

Измерения оптической плотности гидрозолей ДНА производили в присутствии раствора хлорида калия концентраций 0,15 М, 0,2 М и 0,3 М. Согласно расчетам энергии взаимодействия частиц по теории Дерягина – Ландау – Фервея – Овербека (ДЛФО) при таких концентрациях электролита потенциальный барьер, препятствующий агрегации частиц, отсутствует.

При расчетах степени агрегации частиц использовались усредненные значения оптической плотности двух опытов, проведенных при одной и той же концентрации хлорида калия и близких температурах. Степень воспроизводимости результатов измерений была высока.

По изменению оптической плотности от времени с учетом полидисперсности агрегатов рассчитывали относительную степень агрегации  $v(t)$ , согласно статье А. Г. Овчаренко и др. «Электрофоретическое поведение агрегатов ультрадисперсных алмазных частиц» («Коллоидный журнал», т. 53, № 6, 1991 г.).

На рис. 1 приведены данные для суспензий ДНА с добавлением хлорида калия до концентраций 0,2 М и 0,3 М. Из рисунка видно, что с ростом концентрации электролита в суспензии быстрее происходит процесс коагуляции. Очевидно, что несмотря на данные расчетов по теории ДЛФО наблюдается увеличение влияния электролита на сжатие двойного электрического слоя частиц ДНА в суспензии.

На рис. 2 приведены данные для одинаковых суспензий ДНА в присутствии хлорида калия с равной концентрацией 0,15 М при различных температурах. Из рисунка видно, что чем ниже температура внешней среды, тем позже проявляется эффект агрегации в суспензии. Это можно объяснить тем, что в отсутствие электростатического фактора устойчивости коагуляция частиц ДНА в суспензии определяется соударением этих частиц, которое напрямую зависит от температуры.

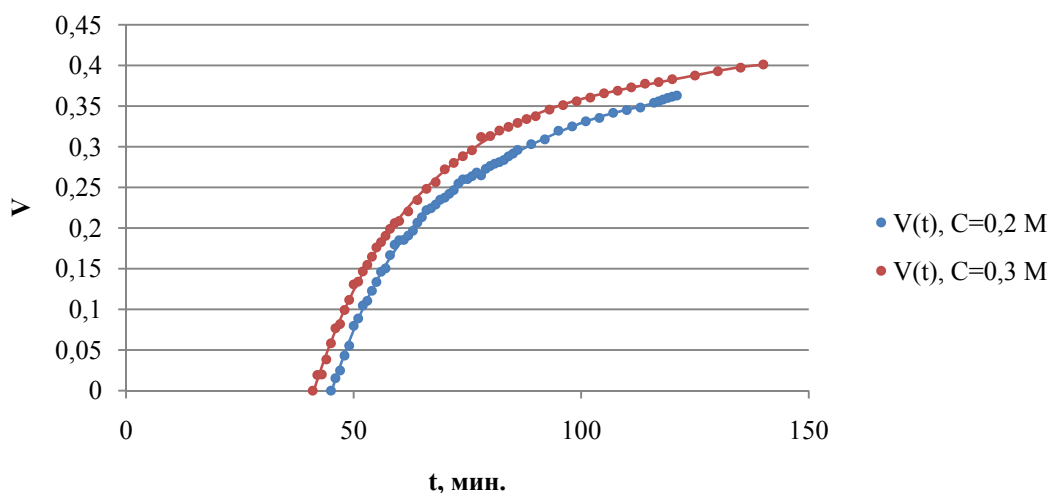


Рис. 1. Результаты расчетов относительной степени агрегации для суспензий ДНА в присутствии хлорида калия концентраций 0,2 М и 0,3 М

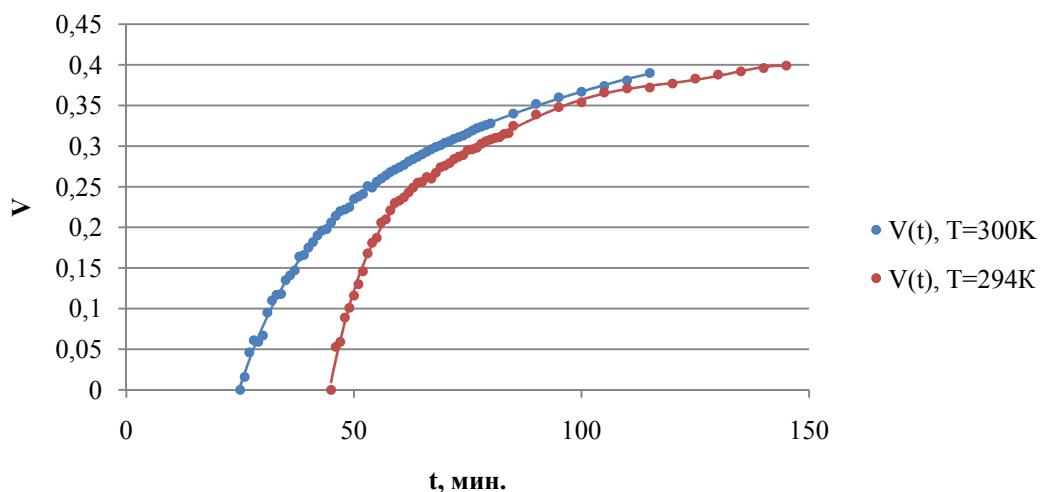


Рис. 2. Результаты расчетов относительной степени агрегации для водных суспензий ДНА в присутствии хлорида калия концентрации 0,15 при двух различных температурах

Сопоставление результатов экспериментов с расчетами энергии взаимодействия частиц ДНА по теории ДЛФО позволяет предполагать наличие дополнительного к электростатическому фактора агрегативной устойчивости гидрозолей. Предположение о влиянии гидратных граничных слоев на поверхности ДНА подтверждается обратимостью коагуляции при удалении электролита.



## АГРЕГАТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЗОЛЕЙ НАНОАЛМАЗОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ КАТИОНАМИ ХРОМА

С.А. Киселева

Научный руководитель д-р техн. наук Г.А. Чиганова

*Сибирский федеральный университет*

Наноалмазный порошок используется как дисперсионно-упрочняющий компонент электрохимических и химических покрытий, повышающий их микротвердость, износостойкость и коррозионностойкость. При получении таких покрытий важную роль играют электроповерхностные свойства частиц наноалмазов.

Эти характеристики наночастиц определяют также возможность получения электрофоретических покрытий при электроосаждении частиц дисперсной фазы золей.

Объектом исследования в данной работе были гидрозолы наноалмазов, полученные ультразвуковой обработкой порошка в воде в течение 3 минут. Диспергирование проводилось на источнике стержневого типа УЗДН-А с частотой 22 кГц, концентрация наноалмазов в гидрозоле составляла 0,1 массовый процент.

В исследуемых гидрозолях использовались наноалмазы, очищенные хромовой смесью, производства РФЯЦ-ВНИИТФ. В результате такой очистки происходит модифицирование поверхности наноалмазов ионами хрома, содержание хрома на поверхности данных наноалмазов составляло 0,7 %.

Среднечисленный диаметр частиц, определенный с помощью дисковой центрифуги CPS 24 000, составляет 14 нм.

В качестве индифферентного электролита был выбран хлорид калия с концентрациями  $10^{-5}$  М,  $10^{-4}$  М,  $5 \cdot 10^{-4}$  М,  $10^{-3}$  М.

Для наноалмазов, произведенных РФЯЦ-ВНИИТФ, методом макроэлектрофореза был определен заряд частиц и средние расстояния, на которые переместилось положение границы золя с раствором в каждом колоне с электродами противоположного знака.

По формуле Духина – Дерягина для частиц ионитов (1) были проведены расчеты электрокинетического потенциала  $\zeta$ , полученные результаты представлены на рис. 1.

$$U_{эф} = \varepsilon_0 ERT / 4\pi\eta F (\tilde{\xi}/2 - \sin \tilde{\xi} \ln \tilde{\xi}/4), \quad (1)$$

где  $\tilde{\xi}$  – безразмерный электрокинетический потенциал:  $\tilde{\xi} = e\xi/\varepsilon_0 kT$ .

Обращает на себя внимание экстремальный характер полученной зависимости, тем не менее, из литературы известны аналогичные экспериментальные факты (например, работа Игнатченко А. В. и др. // Докл. V Всесоюз. совещ. по детонации. Красноярск, 1991. Т. 1. С. 166–170).

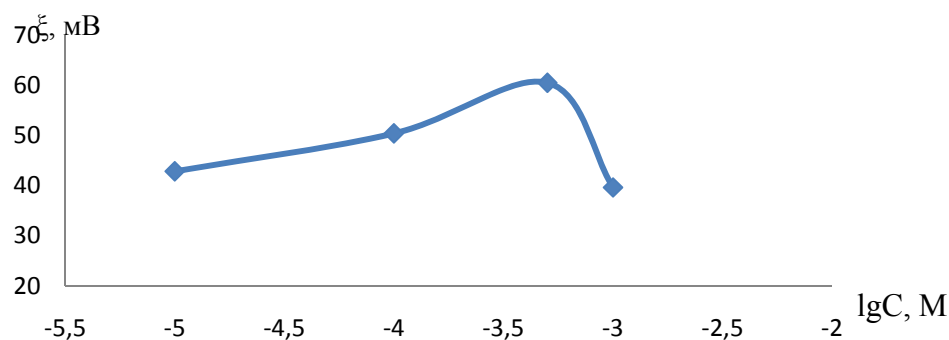


Рис. 1. Зависимость значений электрокинетического потенциала от концентрации электролита

В рамках теории Дерягина – Ландау – Фервея – Овербека (ДЛФО) был проведен расчет суммарной энергии молекулярного притяжения и электростатического отталкивания частиц наноалмазов. Энергию молекулярного притяжения частиц наноалмазов рассчитывали по уравнению Гамакера:

$$U_m = -A/6\{2/(S^2 - 4) + 2/S^2 + \ln[(S^2 - 4)/S^2]\}, \quad (2)$$

где  $A$ —константа Гамакера,  $A = 10^{-19}$  Дж для дисперсий алмаза;  $S = (2a + h)/a$  ( $h$  — расстояние между поверхностями частиц,  $a$  — их радиус).

Энергию электростатического отталкивания частиц в растворах хлорида калия можно определить по уравнению:

$$U_e = 4\pi\epsilon\epsilon_0 a \psi_\delta^2 (a + h) / (2a + h) \ln[1 + \exp(-\kappa h) / (a + h)], \quad (3)$$

где  $\psi_\delta$  — потенциал слоя Штерна, приравниваемый в разбавленных растворах электролитов к электрокинетическому потенциалу;  $1/\kappa$  — толщина диффузной части двойного электрического слоя.

Полученные в результате расчетов потенциальные кривые взаимодействия частиц приведены на рис. 2.

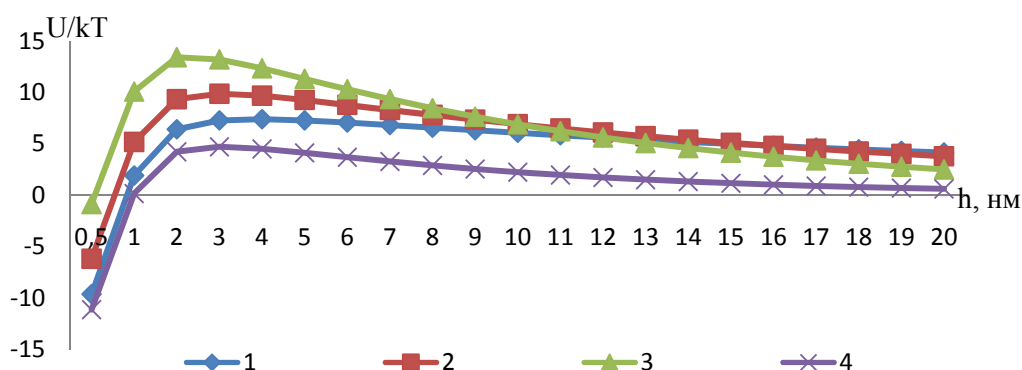


Рис. 2. Потенциальные кривые парного взаимодействия частиц в растворах хлорида калия: 1 –  $C=10^{-5}$  М, 2 –  $C=10^{-4}$  М, 3 –  $C=5 \cdot 10^{-4}$  М, 4 –  $C=10^{-3}$  М

В гидрозолях исследованных наноалмазов потенциальный барьер, препятствующий агрегации частиц и обусловленный электростатическими силами, с ростом концентрации индифферентного электролита сначала увеличивается, а затем уменьшается. Причиной такой немонотонной зависимости потенциального барьера от концентрации электролита может являться влияние рН среды на величину электрокинетического потенциала частиц наноалмазов.

УДК 537.311.322; 547.313.2

## **МОДИФИЦИРОВАНИЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ**

**И.А. Маркевич<sup>1</sup>**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук Г.Е. Селютин<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет*

*<sup>2</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН*

Одним из наиболее перспективных полимерных конструкционных материалов является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), который относится к новому поколению полимеров. Такой материал обладает рядом замечательных физико-механических и химических свойств, дающих возможность широкого его применения в различных технологических сферах деятельности. Основными его достоинствами являются низкий коэффициент трения, рекордно высокая ударная прочность, высокая стойкость к абразивному истиранию, стойкость в большинстве агрессивных сред, а также рекордно низкая температурная хрупкость. К тому же этот материал является экологически чистым, его переработка и утилизация не несут угрозы окружающей среде.

За счет применения нанотехнологических подходов возможно создание принципиально новых композиционных материалов на основе СВМПЭ. Так, модифицирование СВМПЭ углеродными нанотрубками (УНТ), в зависимости от характера распределения по полимерной матрице, может позволить получить как проводящий композиционный материал, обладающий механическими свойствами исходного полимера, так и непроводящий материал с высокой диэлектрической проницаемостью.

Благодаря низкому коэффициенту трения, высокой стойкости к истиранию, способности поглощать вибрации СВМПЭ применяют в качестве подшипников скольжения во многих механизмах. В частности, при использовании СВМПЭ в угольной промышленности, железнодорожном транспорте недопустимо появление статического заряда на поверхности, который неизбежно накапливается в случае трения диэлектрика. По этой причине все элементы скольжения должны обладать электронной проводимостью.

Перспективно применение композиционного материала СВМПЭ+УНТ в авиации. Использование материала в конструкции самолета позволит снизить вес судна, повысить вибрационную устойчивость, так как СВМПЭ является прекрасным демпфирующим материалом (коэффициент поглощения (0,75) на порядок превышает высокодемпфирующие алюминиевые сплавы (0,1)), а также предотвратить накопление статического заряда.

Возможно применение композиции СВМПЭ+УНТ в качестве материала, экранирующего электромагнитное излучение. В [1] показано, что композиционный материал на основе полиметилметакрилата с использованием многостенных УНТ показывает высокую эффективность экранирования в диапазоне частот 26–37 ГГц.

Целью настоящей работы является разработка и исследование проводимости композитных материалов на основе СВМПЭ и УНТ.

В настоящей работе использовались СВМПЭ компании Braskem (молекулярная масса  $6,4 \cdot 10^6$  г/моль), многостенные углеродные нанотрубки со средним диаметром от 6 до 22 нм, синтезированные в ИК СО РАН с чистотой 99 % [2].

#### *Получение образцов*

Содержание УНТ в композите составляло 0,5, 1, 5, и 10 масс. %.

Композиционные материалы на основе СВМПЭ и углеродных нанотрубок были получены двумя способами:

- 1) пропиткой порошка СВМПЭ суспензией УНТ (среда толуол) с последующей сушкой и горячим прессованием;
- 2) механоактивацией сухой смеси СВМПЭ и УНТ в аппарате АГО-2 – и дальнейшим изготовлением образцов методом горячего прессования. Механоактивация порошков осуществлялась при скорости вращения барабанов 1290 об./мин. (образцы Р-1) и 2220 об./мин. (образцы Р-3).

#### **Исследование проводимости полученных образцов**

Испытывались образцы со следующими размерами: диаметр 45 мм, толщина 0,7 мм. Определение омического сопротивления проводилось двумя методами. В первом методе образцы зажимались между латунными обкладками конденсатора. Снимались показания омического сопротивления  $R$  с обкладок конденсатора. Значения удельного сопротивления  $\rho$  рассчитывались по формуле

$$\rho = \frac{Rs}{l}, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление;  $s$  – площадь обкладок конденсатора;  $l$  – толщина образца.

Во втором случае использовался четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления полупроводников, заключающийся в снятии разности потенциалов между двумя зондами. Ток пропусклся через образец между двумя другими зондами. В качестве зондов выступали четыре металлических иглы, касающиеся поверхности исследуемого полупроводника.

Регистрировалась разность потенциалов между внутренними зондами и также рассчитывалось удельное сопротивление  $\rho_4$  для всех образцов

$$\rho_4 = \frac{2\pi SU}{I}, \quad (2)$$

где  $S$  – расстояние между зондами;  $U$  – показания вольтметра;  $I$  – ток цепи.

В таблице представлены результаты измерений и расчетов удельного сопротивления для обоих способов измерения, из которых видно, что  $\rho$  в среднем на порядок больше, чем  $\rho_4$ .

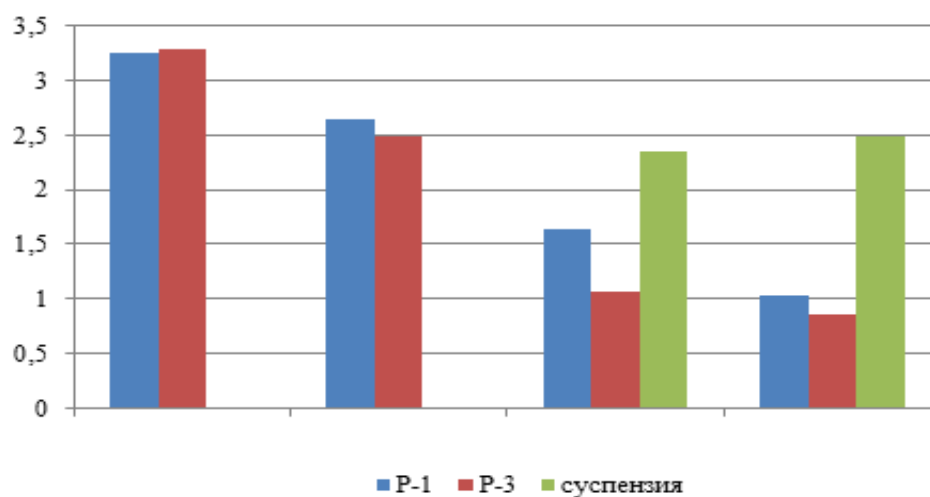
**Таблица.** Результаты расчетов удельного сопротивления

УНТ % масс.	$\rho, \Omega \cdot \text{см}$	$\rho_4, \Omega \cdot \text{см}$
0.5 (P-1)	41514	1755
1 (P-1)	5005	433
5 (P-1)	193	43
10 (P-1)	136	11
0.5 (P-3)	19736	1920
1 (P-3)	6872	311
5 (P-3)	218	11
10 (P-3)	98	7
5 (суспенз)	481	223
10 (суспенз)	188	309

Такие различия в расчетах, вероятно, связаны существованием контактной разницы между металлом конденсатора и композитным образцом.

Для образцов композита, приготовленных пропиткой СВМПЭ суспензией УНТ, с содержанием УНТ 0,5 и 1 % масс. приборы не выявили проводимости, в отличие от таких же образцов, изготовленных механоактивацией.

На рисунке представлена диаграмма зависимости от содержания углеродных нанотрубок в полимерной матрице и от способа приготовления композита.



*Рис. Диаграмма – содержание УНТ % масс.*

С увеличением содержания нанотрубок проводимость материала увеличивается.

Для композитов, приготовленных пропиткой суспензией УНТ, проводимость оказалась в сотни раз меньше, чем для аналогичных образцов Р-1 и Р-3, а для образцов с содержанием УНТ 0,5 и 1 % масс. и вовсе не обнаружено проводимости. Меньшие значения проводимости для образцов, приготовленных из суспензии УНТ, объясняются более однородным распределением углеродных наночастиц в матрице полимера и отсутствием сквозных мостиков проводимости в композите, за счет использования ультразвукового диспергирования при приготовлении суспензии УНТ, которой в дальнейшем пропитывался порошок СВМПЭ.

Значительный вклад в полученные значения проводимости может вносить контактная разность между металлом обкладок и исследуемым материалом. Для получения более точных результатов необходимо совершенствовать контактную группу.

Также следует совершенствовать методику введения УНТ в полимерную матрицу.

#### **Список литературы**

1. Mazov I., Kuznetsov V., Moseenkov S., etc. Electromagnetic shielding properties of MWCNT/PMMA composites in Ka-band // *Physica status solidi (b)*. 2009. V. 246. I. 11–12. Pp. 2662–2666.

2. Mazova I., Kuznetsov V., Simonova I., etc. Oxidation behavior of multiwall carbon nanotubes with different diameters and morphology // *Applied Surface Science*. 2012. № 17. Pp. 6272–6280.

УДК 539.2:533.9(07)

### **ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МАГНИЯ В ВЧ ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ВОДОРОДОСОРБЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**Е.И. Мельникова <sup>а</sup>, А.Л. Колоненко <sup>б</sup>, Г.А. Глущенко <sup>б</sup>, И.В. Осипова <sup>б</sup>**  
**Научный руководитель д-р техн. наук Г.Н. Чурилов <sup>б</sup>**

<sup>а</sup> *Сибирский федеральный университет*

<sup>б</sup> *Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН*

На сегодняшний день широкомасштабному применению водорода в энергетике препятствует проблема его эффективного хранения. Одним из наиболее перспективных способов является хранение водорода в связанном состоянии в виде металлгидридов, отличающихся высокой объемной плотностью водорода [1].

Способы получения металлгидридных порошков для хранения водорода можно разделить на две основные группы. К одной группе можно отнести наноча-

стицы, образующиеся в результате диспергирования объемных материалов «путь сверху», к другой – образующиеся в результате коагуляции из парового или плазменного состояния – «путь снизу».

Плазмохимический процесс позволяет получать наночастицы с низкой концентрацией микронапряжений в кристаллической решетке, а временные затраты существенно сокращаются. Однако плазмохимический синтез, главным образом, используют только для получения наночастиц металла в атмосфере инертных газов, после чего полученные порошки гидрируют под давлением.

Нами были синтезированы нанодисперсные порошки магния в плазме высокочастотного (ВЧ) дугового разряда и исследованы их водородосорбционные характеристики при гидрировании под давлением. На рис. 1 представлена схема плазмохимической установки для синтеза наночастиц. В герметичной водоохлаждаемой камере (1) располагались два электрода: полый водоохлаждаемый никелевый стержень (2), графитовый тигель (3). В графитовый тигель помещался магниевый слиток (5) и нагревался индуктором (4) до температуры 600–700 °С. Дуговой разряд переменного тока (66 кГц, 12 А) (6) осуществлялся между никелевым электродом и расплавленным магнием. Образец 1 был получен в потоке аргона и водорода, образец 2 – в потоке аргона, водорода и гелия. Подача газов осуществлялась со скоростью:  $\text{H}_2$  – 5 л/мин.,  $\text{Ar}$  – 5 л/мин.,  $\text{He}$  – 3 л/мин. Испаренный магний коагулировал с образованием наночастиц и оседал на стенках камеры (1).

Исследование сорбционных параметров синтезируемых веществ выполнялось на разработанной нами установке [2]. Перед дегидрированием полученные образцы очищали от сорбированных из воздуха газов путем выдерживания в вакууме при температуре 100 °С в течение 10 мин. Для осуществления цикла сорбции в ячейку с образцом подавали водород под давлением 3 МПа и выдерживали в течение 10 мин. при температуре 400 °С. После охлаждения ячейку помещали в индуктор и нагревали до 600 °С со скоростью 10 °С/мин. Десорбированный водород накапливался в измерительной камере известного объема, в которой регистрировалось давление. По разнице показаний давления до и в процессе нагрева определяли количество выделившегося водорода.

Методом растровой электронной микроскопии (*SEM Hitachi S-5500*) получены изображения синтезированных наночастиц (рис. 2). Размеры образующихся частиц варьируются от 50 до 500 нм, причем наблюдаются хорошо окристаллизованные частицы и частицы сферической формы, что может быть связано с их оплавлением в процессе синтеза.

Рентгенофазовый анализ (порошковый дифрактометр «Дрон-4»,  $\text{CuK}\alpha$ -излучение) показал, что фаза гидрида магния  $\text{MgH}_2$  присутствовала в обоих образцах после гидрирования под давлением (рис. 3). На рентгенограммах также присутствуют рефлексы, соответствующие фазам  $\text{Mg}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и  $\text{Ni}$ . Образование фаз  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и  $\text{Ni}$  связано с наличием примесей в испаряемом магнии.

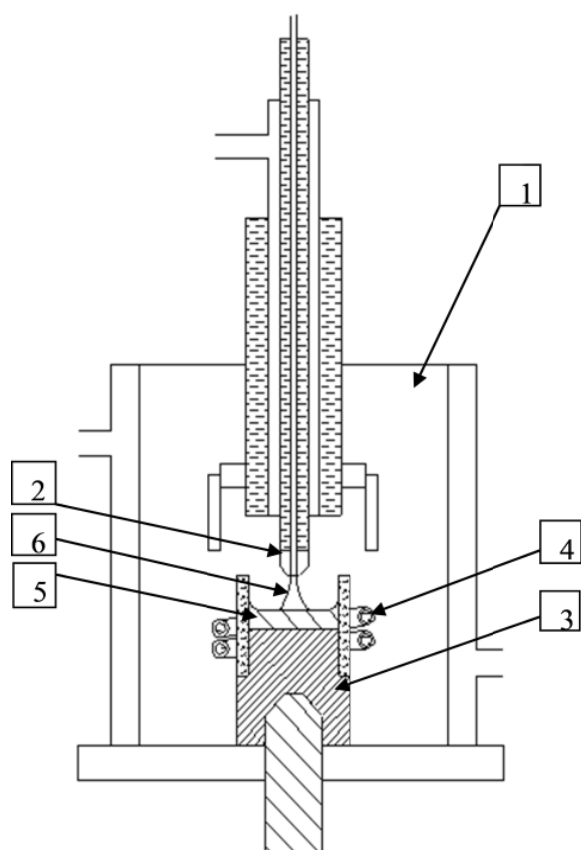
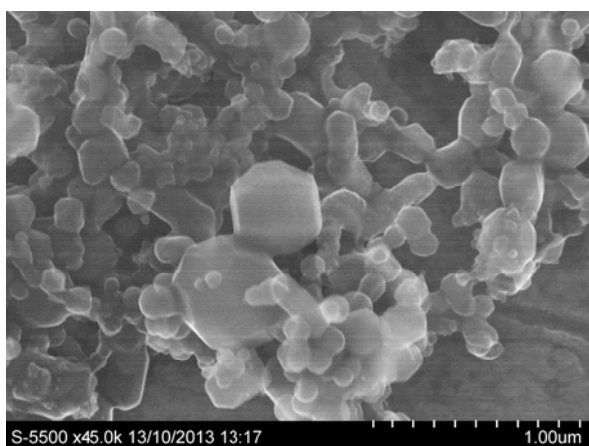
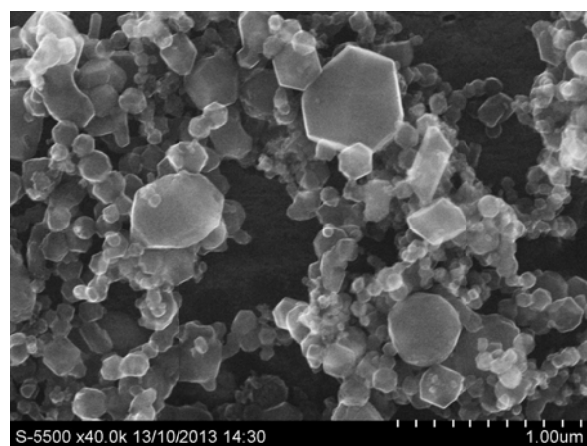


Рис. 1. Схема плазмохимической установки для синтеза наночастиц



а



б

Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения наночастиц магния:  
а – образец 1; б – образец 2



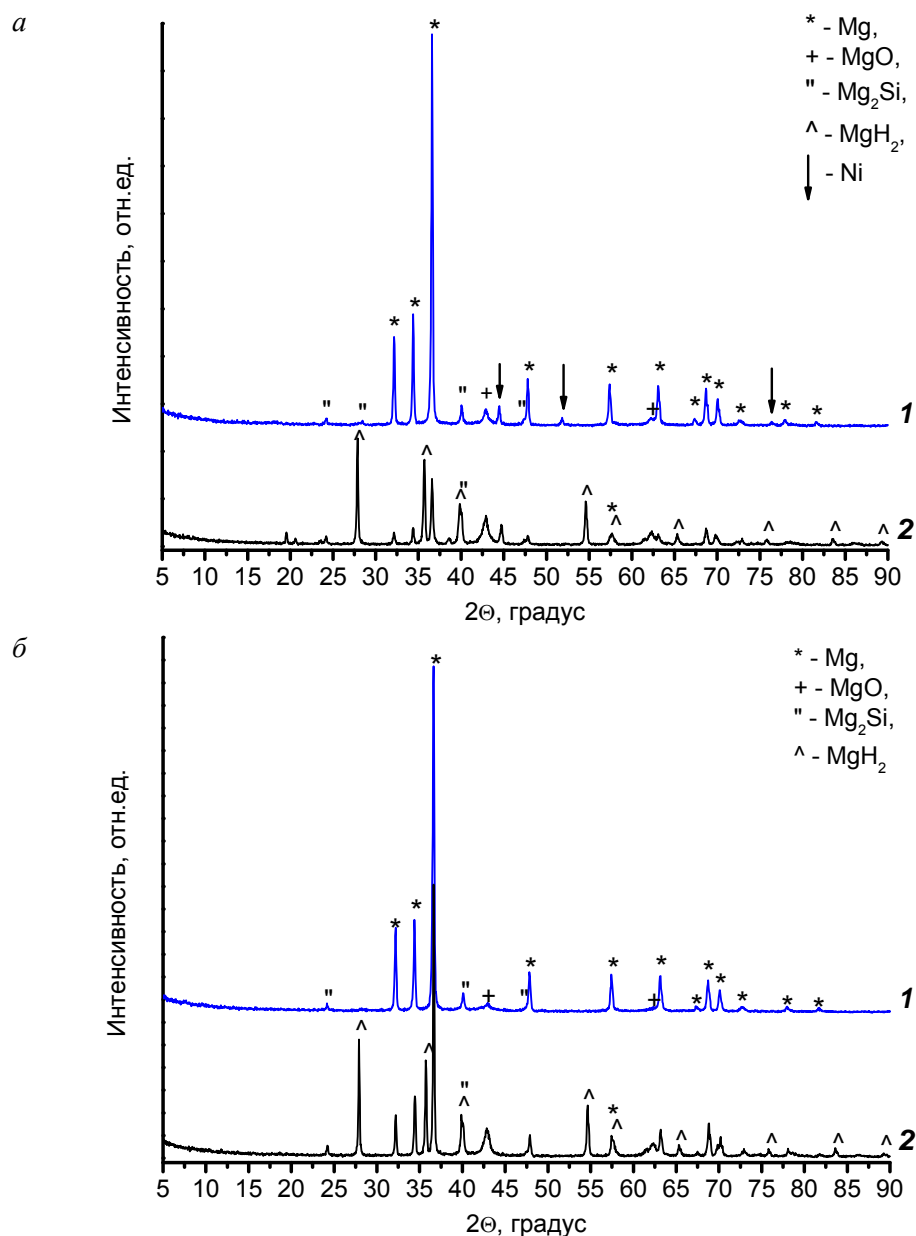


Рис. 3. Рентгенограммы полученных образцов до (1) и после гидрирования под давлением (2): а – о бразец 1; б – образец 2

Кривые зависимостей массы десорбированного водорода от температуры представлены на рис. 4. Выделение водорода приходилось на интервал температур 300–500 °С. Масса десорбированного водорода в образце 1 составила 3,58 вес. % и 3,25 вес. % при первом и пятом циклах, соответственно. Количество десорбированного водорода при 2–4 циклах составило от 3,25 до 3,58 вес. %. Образец 2 выделил всего 0,3 вес. % сорбированного газа, а характер зависимости массы выделяющегося газа от температуры близок к линейному. Исследования устойчивости к рециклированию образца 2 не показали значимых результатов. Такое различие в показаниях обусловлено различными параметрами синтеза.

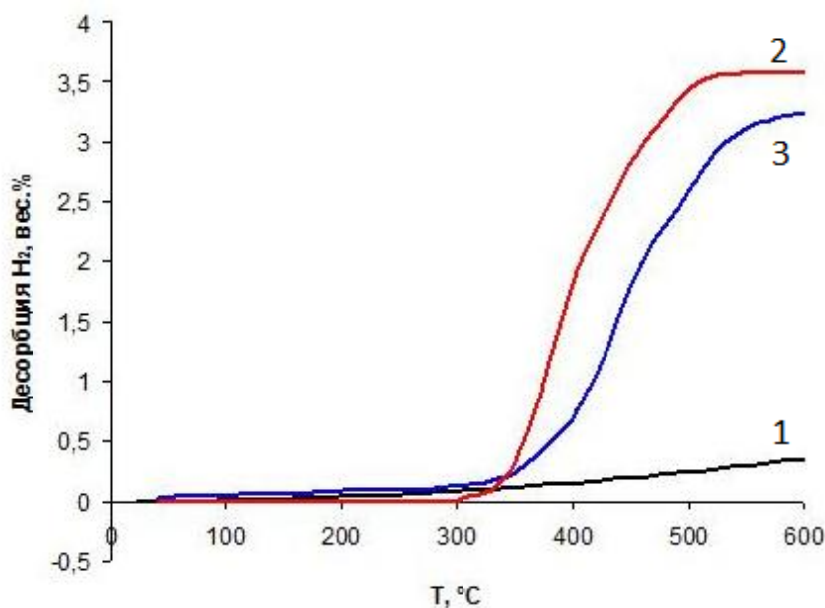


Рис. 4. Зависимость массы десорбированного водорода от температуры: 1 – первый цикл десорбции (образец 2); 2 (3) – первый (пятый) цикл десорбции (образец 1)

Полученные результаты можно объяснить в соответствии с законом Сивер-тса. Растворимость водорода в металле  $S_{H_2}$  пропорциональна парциальному давлению водорода в газовой смеси  $P_{H_2}$ :  $S_{H_2} \sim k \cdot \sqrt{P_{H_2}}$ , где  $k$  – постоянная Сивер-тса [3]. Так как синтез образца 1 проходил в атмосфере водорода, а синтез образца 2 в смеси водорода и гелия, то парциальное давление  $P_{H_2}$ , при котором формировался образец 1, гораздо выше, чем  $P_{H_2}$  образца 2.

Таким образом, нанодисперсные порошки магния, полученные в ВЧ дуго-вом разряде в атмосфере водорода, можно считать перспективными сорбентами водорода. В дальнейшем мы планируем модифицировать установку и, в процессе синтеза, обеспечивать парциальное давление водорода близкое к 100 %.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта НАН Беларуси и СО РАН № 24.

### Список литературы

1. Шалимов Ю. Н. Кудряш В. И. Гусев А.Л. Проблемы применения водо-рода энергетике / Ю.Н. Шалимов // Альтернативная энергетика и экология. 2009. № 3 (71). С. 61–74.
2. Чурилов Г. Н. Осипова И. В. Томашевич Е. В. Гидрирование нанодис-персных порошков, образующихся в потоке углеродно-гелиевой плазмы при вве-дении Ni и Mg // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. Вып. 6. С. 1211–1217.
3. Захаров Н. И. Дюдкин Д. А. Недопекин Ф. В. Теоретическая модель про-цессов переноса при движении металла в электростатическом поле и проблема ее приложения к внепечной дегазации стали. / Н.И. Захаров, // Вестник Донецкого университета. Сер. А: Естественные науки. 2008. Вып. 1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЯЗКОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

**М.С. Сметанина, А.С. Лобасов**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук А.В. Минаков**

*Сибирский федеральный университет*

На сегодняшний день все большую популярность набирают исследования в области различных наноструктур, в частности наножидкостей. Наножидкости характеризуются особыми свойствами переноса – в отличие от крупных дисперсных частиц наночастицы практически не седиментируют, они не подвергают эрозии каналы, по которым движутся. Уникальные свойства наножидкостей резко расширяют границу их применимости. Вместе с тем, систематическое использование наножидкостей станет возможным лишь в том случае, если можно будет заранее предсказывать их свойства. Поэтому изучение свойств наножидкостей – актуальная и важная задача.

Наножидкости представляют собой двухфазную систему, состоящую из несущей среды (жидкости или газа) и наночастиц. Наночастицы – это частицы с характерными размерами от 1 до 100 нм. Типичными несущими жидкостями являются вода, органические жидкости (этиленгликоль, масло, биологические жидкости), полимерные растворы. В качестве твердых наночастиц обычно выступают частицы химически устойчивых металлов и их оксидов.

Изучение процессов переноса в наножидкостях имеет и важную фундаментальную составляющую, поскольку до сих пор часто отсутствует даже качественное их понимание, не говоря уже о построении последовательной физической теории. Несмотря на немалый накопленный фактический материал, как экспериментальный, так и теоретический, здесь все ещё отсутствуют систематические данные, а результаты экспериментов часто противоречивы. Связано это, в том числе, и с объективными причинами, осложняющими проведение соответствующих экспериментов. В частности, пока не удастся точно контролировать размеры и однородность распределения наночастиц, создавать монодисперсные наножидкости, добавление наночастиц может приводить к изменению реологии жидкости. Становится невозможным определить, как будут меняться свойства переноса наножидкостей при варьировании того или иного параметра системы: материала наночастиц, их формы, размеров, объемной концентрации и т. п.

Вязкость наножидкостей является важным параметром при течении жидкости. Тем не менее, собранные данные показали, что до сих пор нет теоретических моделей (Einstein [1]; Brinkman [2]; Batchelor [3]; Frankel & Acrivos [4]; Graham [5]; Lundgren [6]), успешно и точно предсказывающих вязкость наножидкости. Почти все формулы были получены из новаторской работы Эйнштейна [1], которая основана на предположении о линейной вязкости жидкости, содержащей разбавлен-

ные, растворённые и сферические частицы. Формула Эйнштейна оказывается действительной для относительно низкой объемной концентрации частиц менее 0,01. Помимо этого значения, она «недооценивает» эффективную вязкость смеси. Позже многие работы были посвящены «исправлению» его формулы. Brinkman [2] распространил формулу Эйнштейна для её использования при умеренной концентрации частиц. Lundgren [6] предложил уравнение в виде ряда Тейлора. Batchelor [3] рассмотрел влияние Броуновского движения частиц на объёмное напряжение приблизительно изотропных взвесей из жестких и сферических частиц. Graham [5] обобщил работу Frankel & Acrivos [4], но корреляция была представлена для низких концентраций.

Masuda et al. [7] были первыми, кто провёл измерения вязкости нескольких наножидкостей на водной основе для диапазона температур от комнатной до 67 °C. Wang et al. [8] получили, используя три различных метода подготовки, некоторые данные для динамической вязкости  $Al_2O_3$ -вода и  $Al_2O_3$ -этиленгликоль при различных температурах.

Поскольку формулы, такие как, например, предложенная А. Эйнштейном [1], а затем улучшенная Brinkman [2] и Batchelor [3], недооценивают вязкость наножидкости по сравнению с данными измерений, Maiga et al. [9, 10] выполнили методом наименьших квадратов построение кривых по некоторым экспериментальным данным Wang et al. [8], в том числе  $Al_2O_3$ -вода и  $Al_2O_3$ -этиленгликоль. Модель Brinkman [2], полученная для двухфазной смеси, в некоторой степени является достаточной для оценки вязкости при относительно низкой объемной доле частиц (т. е.  $\phi \leq 0,1 \%$ ). Тем не менее, она значительно недооценивает вязкость наножидкости по сравнению с экспериментальными данными при высокой концентрации частиц. Различия в относительной вязкости среди экспериментальных данных могут быть из-за разницы в размерах кластеров частиц, дисперсионных методов и методов измерений.

Стоит отметить, что вообще эффективная вязкость есть функция трёх параметров  $\mu_{эфф}(\phi, T, d)$ : объемная концентрация частиц  $\phi$ , температура  $T$  и диаметр частиц  $d$ . Однако в данной работе рассматривается зависимость вязкости наножидкости только от объемной концентрации частиц, т. к. на сегодняшний день не существует корреляции эффективной вязкости наножидкости, зависящей от всех трех параметров, способной охватить все экспериментальные данные.

Для оценки вязкости суспензии частиц использованы несколько теоретических моделей эффективной вязкости наножидкости на основе  $Al_2O_3$ , полученных различными авторами:

$$\mu = \mu_0(1 + 2,5\phi) \quad (1)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}} = \mu_0(1 + 2,5\phi + 4,375\phi^2 + \dots) \quad (2)$$

$$\mu = \mu_0(1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2) \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{1}{1 - 2,5\phi} = \mu_0(1 + 2,5\phi + 6,25\phi^2 + \dots) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{2,5\varphi}{1 - k\varphi}\right) = [1 + 2,5\varphi + (3,125 + 2,5k)\varphi^2] \quad (5)$$

$1,35 < k < 1,91$

$$\mu = \mu_0 \left[ 1 + \frac{1,25\varphi}{1 - \varphi/0,78} \right] = \mu_0 (1 + 2,5\varphi + 4,75\varphi^2 + \dots) \quad (6)$$

$$\mu = \mu_0 \left[ 1 + \frac{2,5\varphi}{1 - \varphi} \right] = \mu_0 (1 + 2,5\varphi + 2,5\varphi^2 + \dots) \quad (7)$$

где  $\mu_0$  – динамическая вязкость транспортной жидкости,  $\varphi$  – объёмная концентрация наночастиц. Формула (1) взята из работы [1], формула (2) – из работы [2], формула (3) – из работы [3], формула (4) – из работы [6], формула (5) – из [11], формула (6) – из [12], формула (7) – из работы [13].

Тем не менее, собранные данные показали, что данные теоретические модели весьма плохо и неточно предсказывают вязкость наножидкости (см. рисунок). Поэтому, проведя дополнительный всесторонний анализ литературы, для определения динамической вязкости наножидкости на основе  $Al_2O_3$  было решено остановиться на следующей корреляции [14]:

$$\mu = \mu_0 (1 + 7,2\varphi + 123\varphi^2) \quad (8)$$

Для доказательства применимости данной корреляции (см. рисунок) проведено её сравнение с рассмотренными выше экспериментальными значениями вязкости наножидкостей на основе частиц  $Al_2O_3$  (1)–(7). Как видно из графика, корреляция (8) удовлетворительно описывает поведение вязкости в широком диапазоне концентраций частиц, в отличие от остальных рассмотренных корреляций, которые в той или иной степени занижают истинное значение эффективной вязкости.

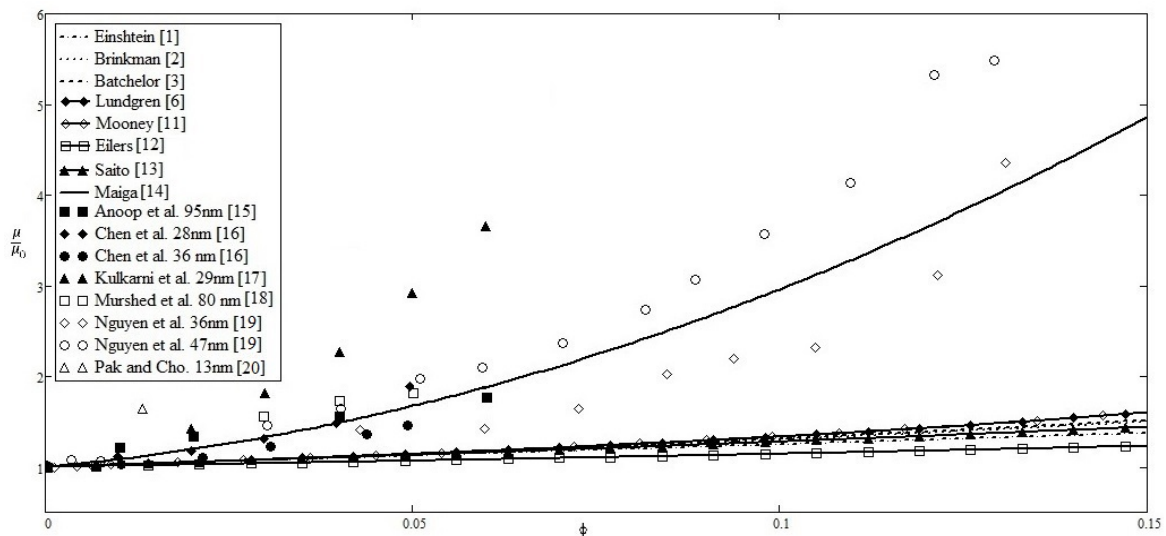


Рис. 1. Экспериментальные данные и теоретические зависимости относительной вязкости наножидкости на основе  $Al_2O_3$ -вода от объёмной концентрации частиц

Как бы то ни было, до сих пор почти ни одна из упоминаемых моделей не может предсказать вязкость наножидкости в широком диапазоне объемной концентрации наночастиц. В соответствии с найденными корреляциями эффективная вязкость зависит только от вязкости базовой жидкости и концентрации частиц, в то время как экспериментальные исследования показывают, что температура, диаметр частиц и вид наночастиц также могут повлиять на эффективную вязкость наножидкости.

Таким образом, можно констатировать, что на сегодняшний день не существует универсальных эмпирических корреляций и теоретических моделей, с приемлемой точностью описывающих поведения вязкости наножидкости в широком диапазоне параметров. Поэтому необходимо хорошее понимание реологических свойств и режима течения наножидкости перед тем, как наножидкости могут внедряться на рынке в приложениях передачи тепла.

### Список литературы

1. Einstein A. A new determination of the molecular dimensions // *Ann. Phys.*, Vol. 19, Pp. 289-306, 1906.
2. Brinkman H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solution // *J. Chem. Phys.*, Vol. 20, P. 571, 1952.
3. Batchelor G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in the suspension of spherical particles // *J. Fluid Mech.*, Vol. 83, Pp. 97-117, 1977.
4. Frankel N. A. & Acrivos A. On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres // *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 22, Pp. 847-853, 1967.
5. Graham A. L. On the viscosity of suspension of solid spheres // *Appl. Sci. Res.*, Vol. 37, Pp. 275-286, 1981.
6. Lundgren T. S. Slow flow through stationary randombeds and suspensions of spheres // *J. Fluid Mech.*, Vol. 51, Pp. 273-299, 1972.
7. Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  ultra-fine particles) // *Netsu Bussei* 4, Pp. 227-233, 1993.
8. Wang, X.; Xu, X. & Choi, S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture // *J. Thermophys. Heat Tr.*, Vol. 13, Pp. 474-480, 1999.
9. Maiga S., Palm S. J., Nguyen C. T., Roy G., Galanis N. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows // *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 26, Pp. 530-546, 2006.
10. Maiga S., Nguyen C.T., Galanis N., Roy G., Mar'e T., Coqueux M. Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle suspension // *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, Vol. 16, Pp. 275-292, 2006.
11. Mooney M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles // *J. Colloid Sci.*, Vol. 6, Pp. 162-170, 1951.
12. Eilers V. H. Die viskositat von emulsionen hochviskoser stoffe als funktion derkonzentration // *Kolloid-Zeitschrift*, Vol. 97, Pp. 313-321, 1941.
13. Saito N. Concentration dependence of the viscosity of high polymer solutions // *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 5, Pp. 4-8, 1950.

14. Maiga S. E. B., Nguyen C. T., Galanis N., Roy G. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube // *Superlattices Microstruct.*, Vol. 35, Pp. 543–557, 2004.
15. Anoop K. B., Kabelac S., Sundararajan T., Das S. K. Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration // *J. Appl. Phys.*, Vol. 106, 2009.
16. Chen H., Ding Y., He Y., Tan Ch. Rheological behavior of ethylene glycol based titania nanofluids // *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 444, Pp. 333–337, 2007.
17. Kulkarni D. P., Das D. K., Chukwa G. Temperature dependent rheological of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid) // *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol. 6, Pp. 1150–1154, 2006.
18. Murshed S. M. S., Leong K. C., Yang C. Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions (Nanofluids) // *IEEE Emerging Technologies-Nanoelectronic Conference*, 2006.
19. Nguyen C. T., Desgranges F., Roy G., Galanis N., Marre T., Boucher S., Mintsu H. A. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids–hysteresis phenomenon // *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, Pp. 1492–1506, 2007.
20. Pak B. C., Cho Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles // *Exp. Heat Transfer*, Vol. 11, Pp. 151–170, 1999.

## **ОТКРЫТАЯ ФИЗИКА**

УДК 691:002.8

### **РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ МАСС ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ГЛИНЫ ПЕРВОМАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**А.Д. Козьмин, В.А. Григорьева, А.О. Щурин  
Научный руководитель С.И. Мушарапова**

*Сибирский федеральный университет*

В настоящее время поставлена задача по обеспечению населения качественным и доступным жильем. Доля керамических строительных материалов в общем объеме промышленного и жилищного строительства достаточно высока. Это обусловлено невысокими эксплуатационными издержками, экологичностью, архитек-

турной выразительностью и долговечностью. Современное состояние сырьевой базы керамической промышленности предопределяет необходимость разработки составов масс на основе новых и ранее не применявшихся компонентов. Данный аспект становится особенно актуальным в случае внедрения технологии однократного обжига при производстве кирпича или плитки для внутренней отделки.

В условиях скоростного обжига основной задачей является обеспечение формирования фазового состава и структуры керамического черепка в короткий период времени, что возможно осуществить за счет введения высокоэффективного плавня. Наиболее подходящим плавнем является полевошпат. Однако в связи с его дефицитностью в последние годы все больше используются заменители, такие как кварц-полевошпатовые отходы. К их числу можно отнести и полевошпатовые отходы Сорского комбината, представляющие собой «хвосты» обогащения молибденовых руд. Они однородны по минералогическому составу и состоят из полевого шпата (50–60 %), кварца (15–25 %), карбонатов (8–15 %), и незначительного количества примесей в виде магнетита, гематита, эпидота и других минералов. На рентгенограмме полевошпат представлен аналитическими линиями  $d = 3,21; 2,91$  (альбит),  $d = 4,02; 3,18; 2,91; 1,77$  (ортоклаз), кварц фиксируется линиями с межплоскостными расстояниями  $d = 4,24; 3,34; 2,28; 2,23; 2,12; 1,81$  и железистые минералы  $d = 2,52; 2,19$  (рис. 1).

В данной работе приводятся результаты исследований по разработке составов масс на основе глины Первомайского месторождения, с использованием в качестве плавня отходов Сорского молибденового комбината для производства керамических плиток и кирпича.

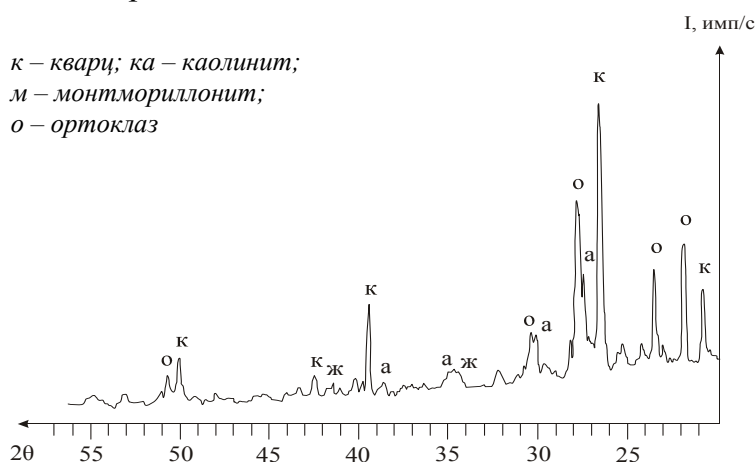


Рис. 1. Рентгенограмма Сорских «хвостов»

Минералогический состав глины представлен каолином ( $d = 3,55; 3,57$ ), монтмориллонитом ( $d = 4,64; 4,45; 2,55$ ) и гидромусковитом (рис. 2). Из неглинистых присутствует кварц ( $d = 4,30; 4,24$ ), альбит ( $d = 3,21; 2,95$ ) и в незначительном количестве оксид железа ( $d = 2,69; 2,51$ ) и ряд других минералов.

Для определения оптимального состава масс керамической плитки и кирпича брались составы на основе глины Первомайского месторождения, расположенного вблизи развивающегося промышленного города Ачинск





Рис. 2. Рентгенограмма глины Первомайского месторождения

Глину после сушки размалывали в фарфоровой мельнице до остатка на сите 0,05 мм не более 5 % и смешивали с сорскими «хвостами» без предварительного их помола, поскольку они представляют собой готовый продукт для использования в керамическом производстве. При формировании состава в глину вводили 15 % Сорских «хвостов». Массы увлажняли до 22–25 %, после чего изготавливали образцы пластическим формованием. После сушки определяли воздушную усадку, а затем обжигали при температурах 800–1150 °С с интервалом 50 °С и выдержкой при конечной температуре 20 минут. После обжига рассчитывали огневую усадку образцов, водопоглощение, прочность на сжатие и проводили их рентгенофазовый анализ.

Из анализа кривых зависимости огневой усадки ( $\Delta L$ ), водопоглощения ( $W$ ) и прочности на сжатие ( $\sigma$ ) от температуры для образцов из чистой глины (рис. 3, 4, 5) огневая усадка начинается с 850 °С, и изменяется незначительно до 950 °С, затем возрастает и при 1050 °С составляет 6 %. В соответствии с этим водопоглощение с 850 °С начинает медленно уменьшаться до 1000 °С, затем скорость убывания возрастает и с 1050 °С до 1150 °С снижается с 16 % до 2 %. При этом прочность с 800 °С начинает возрастать и при 1000 °С достигает значения 10 МПа, а при 1100 °С – 13,2 %.

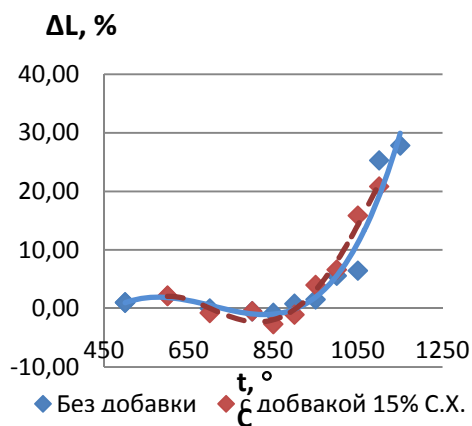


Рис. 3. Кривая зависимости огневой усадки от температуры обжига

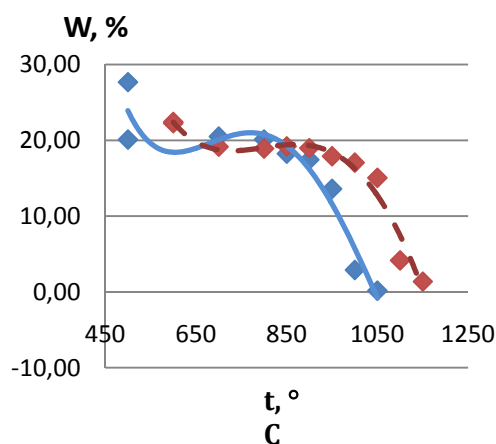


Рис. 4. Кривая зависимости водопоглощения от температуры обжига

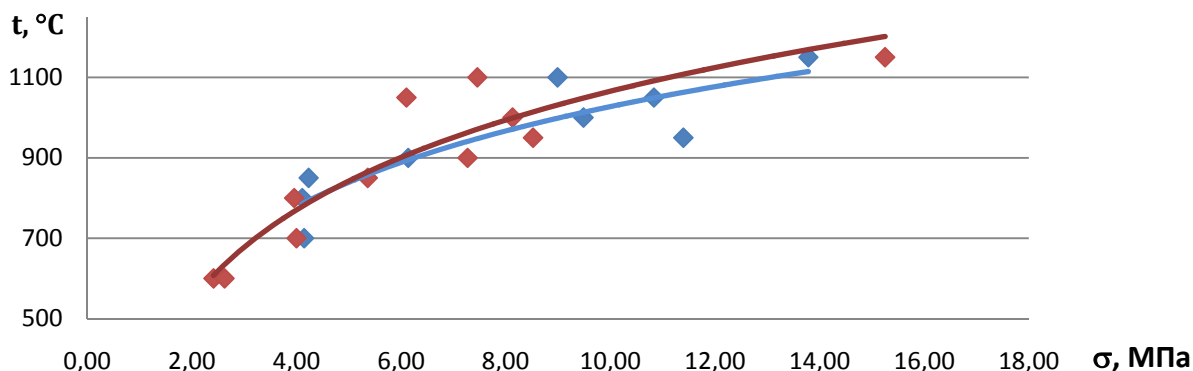


Рис. 5. Кривая зависимости прочности от температуры обжига

Как видно из кривых зависимости огневой усадки, водопоглощения и прочности на сжатие, с введения в керамическую массу 15 % Сорских «хвостов», физико-химические процессы идут более интенсивно. Огневая усадка при температуре 1050 °C уменьшается и становится равной 3,2 %. При этом водопоглощение и прочностные характеристики практически не изменяются. Существенно прочность образцов возрастает с обжигом при 1150 °C. Как показали рентгеноструктурные исследования, этот эффект достигается за счет образования большего количества жидкой фазы, которая появляется в результате плавления альбита, содержащегося в Сорских «хвостах». В жидкой фазе частично растворяется кварц. Фазовый состав керамического черепка, сформированный полурасплавленным кварцем, расплавленным альбитом и вновь образовавшимися минералами, обеспечивает изделию хорошие физико-механические свойства.

Также проводились исследования по влиянию Сорских «хвостов» на процесс спекания керамического черепка на основе глины, пробы которой были взяты с другого участка Первомайского месторождения. Пробы глин с разных участков показали, что их минералогический состав отличается большим содержанием каолина, что видно из рентгенофазового анализа (рис. 6). Поэтому была поставлена задача по установлению влияния его количественного содержания в керамических массах на оптимальную температуру обжига, интервалы спекания и физико-механические свойства изделий. С этой целью был рассмотрен состав керамических масс без добавок полевошпатных отходов и с их введением в количестве 15 %.

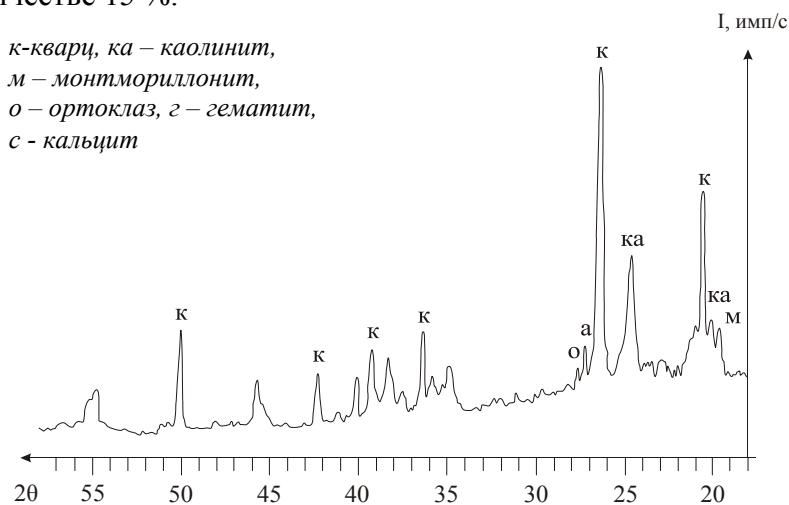


Рис. 6. Рентгенограмма глины Первомайского месторождения

Формование образцов проводилось пластичным способом, описанным ранее. Высушенные образцы подвергались обжигу в интервале температур 800–1150 °С с выдержкой при конечной температуре 20 мин. После обжига у образцов определялась огневая усадка (рис. 7), водопоглощение (рис. 8) и прочность на сжатие (рис. 9) и проводился рентгенофазовый анализ.

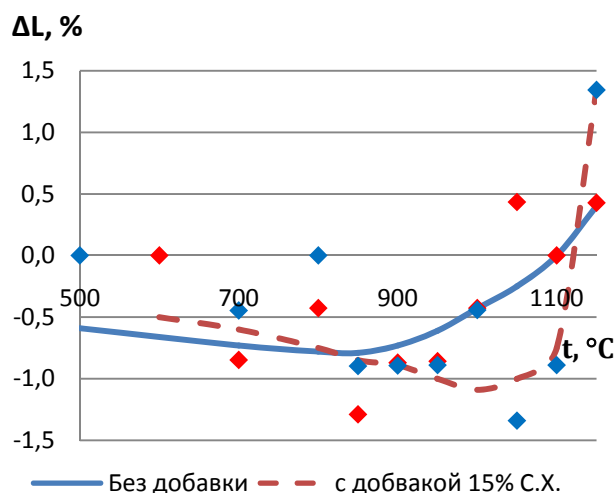


Рис. 7. Кривая зависимости огневой усадки от температуры обжига

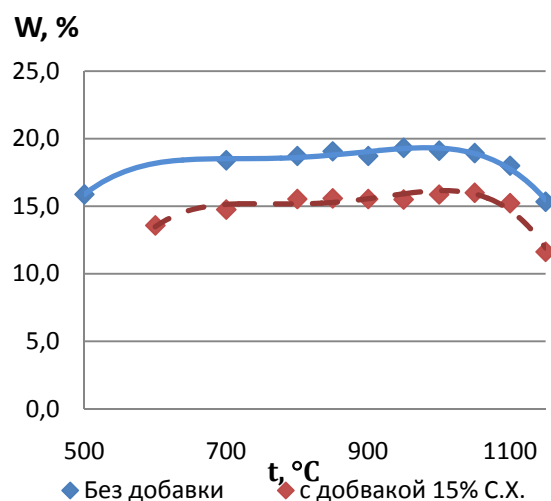


Рис. 8. Кривая зависимости водопоглощения от температуры обжига

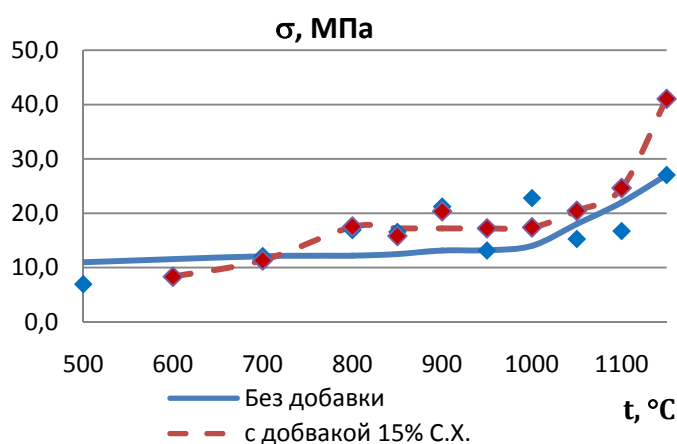


Рис. 9. Кривая зависимости прочности от температуры обжига

Как видно из графиков, введение Сорских «хвостов» способствует увеличению огневой усадки при температуре 1050 °С, уменьшению водопоглощения и увеличению прочности.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что из керамических масс на основе глины разных проб Первомайского месторождения с использованием отходов Сорского молибденового комбината возможно производство кирпича с температурой обжига 1050–1100 °С и облицовочной плитки с температурой обжига 1100–1150 °С.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЛАМП

**Е.К. Бокова**

**Научные руководители Т.Ю. Ильина, Ю.Б. Калашников**

*Сибирский федеральный университет*

Проблема рационального использования энергетических ресурсов приобретает все большую актуальность для мирового сообщества, а ее решение становится стратегической задачей для многих государств, в том числе и для России. Согласно энергетической стратегии России на период до 2030 года, введенной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. N 1715-р, *«Стратегической целью государственной энергетической политики в сфере обеспечения энергетической безопасности является последовательное улучшение ее следующих главных характеристик: ... способность потребительского сектора экономики эффективно использовать энергоресурсы, предотвращая нерациональные затраты общества на собственное энергообеспечение...»*.

Современные световые технологии позволяют сэкономить на освещении до 40 % потребляемой электроэнергии, что в мировом масштабе эквивалентно 106 млрд евро в год. Если рассматривать вопрос об энергосбережении в меньших масштабах, то целесообразным представляется выяснить, действительно ли энергосберегающие лампочки экономят наш бюджет.

**Тема:** Исследование эксплуатационных характеристик различных типов ламп.

**Цель:** Исследовать эксплуатационные характеристики различных бытовых источников света и выяснить эффективность замены лампы накаливания (ЛН).

### **Задачи:**

- Изучить технические аспекты различных источников света компактной люминесцентной лампы, лампы накаливания, светодиодной лампы (КЛЛ, ЛН, СД).
- В лабораторных условиях определить изменение эксплуатационных характеристик (световой поток, температура поверхности) различных типов ламп.
- Определить электрические характеристики различных типов ламп.
- Провести социологическое исследование и определить среднее количество включений/выключений ламп в различных типах помещений жилых квартир.
- Определить экономическую целесообразность бытового использования различных типов ламп.

### **1. Экспериментальная часть**

#### **1.1. Методика проведения эксперимента**

Объектами исследования данной работы являются бытовые осветительные приборы: лампа накаливания, компактная люминесцентная лампа, светодиодная лампа.

Для определения различных параметров осветительных устройств нами была собрана лабораторная установка.

В начале эксперимента все лампы были включены на 10 минут для их полного прогрева. Затем производилась серия включений/выключений. Включения/выключения были «горячими» (лампы не успевали остыть). Через фиксированное количество включений/выключений производились замеры параметров. Результаты замеров заносились в журнал эксперимента. Для определения светового потока использовался люксметр *Testo 540*. Замер освещенности проводился в затемненном помещении на фиксированном расстоянии (1, 2 и 3 м) от источника света. При замерах освещенности от одного источника света остальные два накрывались светонепроницаемыми кожухами. Результаты заносились в журнал эксперимента. Для определения температуры поверхности ламп использовался тепловизор *Testo 875-1*. Тепловизионная съемка производилась под прямым углом к поверхности лампы на расстоянии 1 м. Полученные термограммы обрабатывались в приложении *IR-soft*: определялась средняя температура поверхности каждой лампы. Результаты заносились в журнал эксперимента [3]. Для определения параметров электрической сети использовался мультиметр. Используя разрывы сети, поочередно замерялись сила тока и напряжение. Результаты заносились в журнал эксперимента. Для определения среднего количества включений/выключений верхнего освещения в различных типах помещений жилых квартир был проведен социологический опрос. Респонденты должны были в течение одного дня фиксировать количество включений/выключений в каждом типе помещений своих квартир. Была предложена следующая типологизация помещений: коридор, кухня, санузел, гостиная, спальня. Полученные данные заносились в журнал социологического опроса. Определение экономической эффективности использования различных типов ламп основано на пересчете используемой электрической энергии лампы в люмены и в рубли. Полученное значение люм./руб. сопоставлялось со стоимостью лампы и рассчитывалось время окупаемости КЛЛ и СД по сравнению с СД.

В качестве тарифа на электроэнергию взято значение 1,12 руб за кВт/ч. Расчет относительного срока окупаемости лет выполнялся по формуле [2]:

$$CO_{cp} = \frac{3}{ГЭ_{св}},$$

где 3 – затраты на внедрение данного мероприятия, определяются по рыночной цене;  $ГЭ_{св}$  – экономия энергетических ресурсов в стоимостном выражении, тыс. руб., рассчитанная по формуле [2].

$$ГЭ_{св} = \frac{T_{тэр} \cdot П_{тэр} \cdot K_э}{1000},$$

где  $П_{тэр}$  – потребление ресурса до внедрения мероприятия;  $K_э$  – оценка экономии ресурса за счет внедрения мероприятия;  $T_{тэр}$  – тариф.

Результаты расчета представлены в условных единицах и необходимы для сравнения эффективности установки различных типов ламп.

## 1.2. Результаты эксперимента

### 1.2.1. Изменение светового потока в зависимости от количества включений/выключений

В ходе эксперимента было произведено 12 000 включений-выключений каждой лампы. Результаты замеров освещенности представлены на графике рис. 2.

На расстоянии 1 м световой поток у ЛН падает, но на расстоянии 2–3 метров он практически не меняется. У КЛЛ на расстоянии 1–2–3 метра показания практически не меняются. На расстоянии 1 м у СД световой поток растет, причем достаточно стремительно. Это значит, что со временем СД и КЛЛ будут показывать большую яркость, нежели в начале работы. Что касается ЛН, то тут все стабильно.

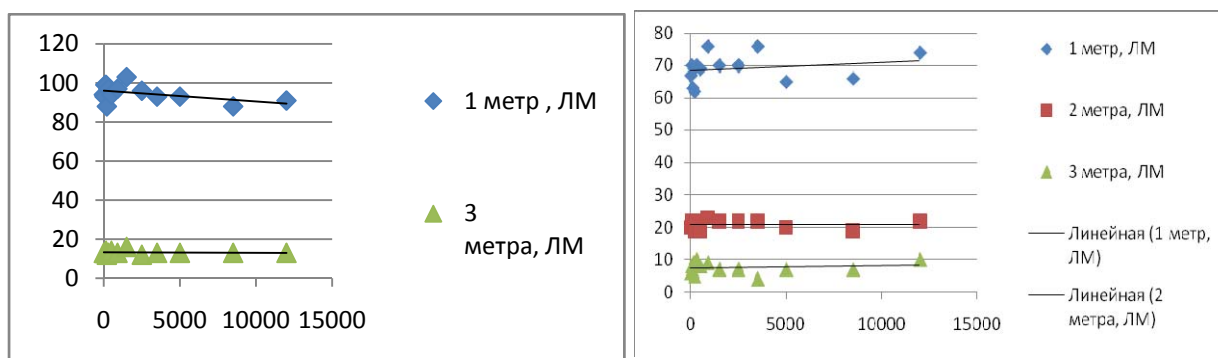


Рис. 1. Изменение светового потока ЛН и КЛЛ в зависимости от количества включений/выключений

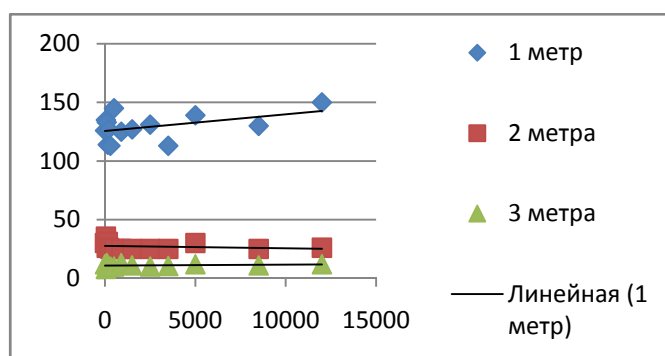


Рис. 2. Изменение светового потока СД в зависимости от количества включений/выключений

### 1.2.2. Изменение температуры поверхности ламп в зависимости от количества включений/выключений

После проведения эксперимента мы получили данные, результат обработки которых можно увидеть на рис. 3.

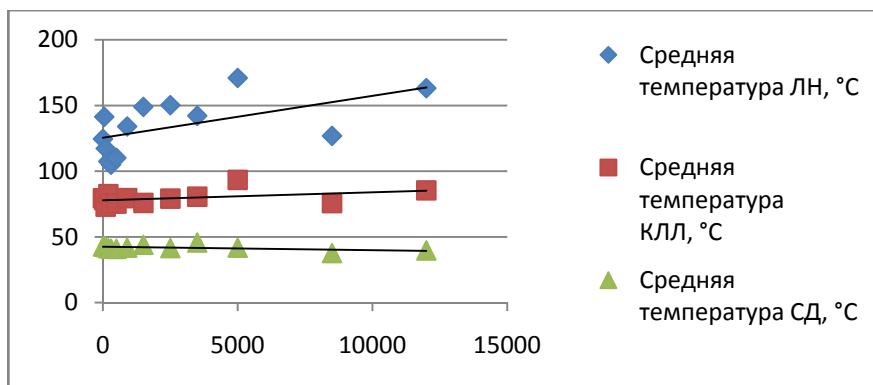


Рис. 3. График температур ЛН, КЛЛ и СД

Температура ЛН значительно растет на протяжении всего эксперимента, у КЛЛ постепенно возрастает, а у СД практически не меняется.

1.2.3. Изменение параметров электрической сети (сила тока, напряжение, сопротивление) в зависимости от количества включений/выключений

После очередного цикла включения/выключения ламп проводились замеры параметром электрической цепи: сила тока, напряжение, сопротивление.

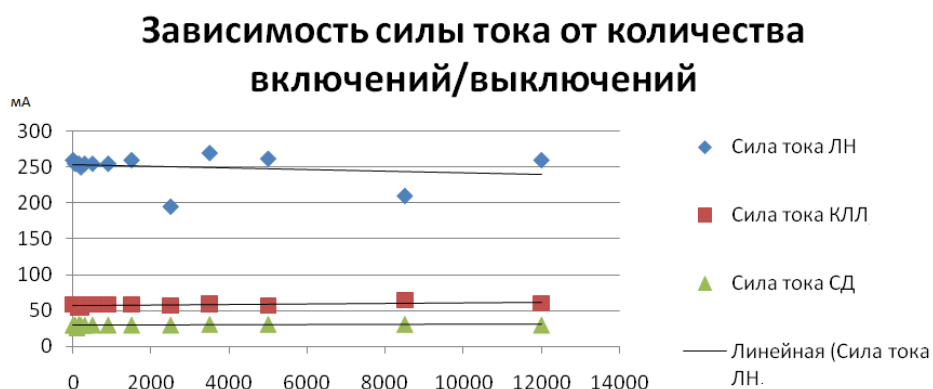


Рис. 4. Зависимость силы тока от количества включений/выключений

Сила тока падает у ЛН, а у КЛЛ и СД зависимость очень близка к линейной.

1.2.4. Обработка результатов социологического опроса

В социологическом опросе приняло участие 100 человек из красноярска, москвы, остерзунда (швеция) и кракова (польша). Результаты опроса представлены в табл. 1. и на рис. 4.

**Таблица 1.** Распределение вероятностей включения/выключения верхнего освещения в различных типах помещений жилых квартир

Тип помещения	Коридор	Санузел	Кухня	Гостиная	Спальня
Средняя	4,9	9,5	6,4	4,3	4,5
Стандартное отклонение	2,5	3,7	3,4	2,3	2,4

### 1.2.5. Расчет экономической эффективности использования различных типов ламп

Для расчета использовались результаты средней светимости различных типов ламп на расстоянии 2 м, полученные в ходе эксперимента. Результаты расчета представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Сопоставление стоимости получения 1 Лк от различных типов ламп

Тип лампы	ЛН	КЛЛ	СД
Световой поток, Лк	29,43	20,86	27,11
Сила тока, А	249,79	57,93	30,00
Стоимость 1 Лк, руб.	9,51	3,11	1,24
Эффективность, %	–	67,3	87,0

Из таблицы видно, что использование КЛЛ по сравнению с ЛН эффективнее на 67,3, а СД – на 87 %. Расчет относительного срока окупаемости представлен в табл. 3.

**Таблица 3.** Результат расчета относительного срока окупаемости замены ЛН на КЛЛ или СД

Тип лампы	КЛЛ	СД
Затраты (З), руб.	174	630
Относительная экономия ( $\Gamma\mathcal{E}_{\text{св}}$ )	18821,7	5642,04
Потребление ресурса до внедрения мероприятия ( $\Pi_{\text{тзр}}$ )	249,79	249,79
Оценка эффективности ( $K_{\text{э}}$ )	67,3	87,0
Тариф, руб.	1,12	1,12
Относительный срок окупаемости ( $\text{CO}_{\text{ср}}$ )	9,245	25,896

Результаты расчета говорят о том, что экономическая эффективность замены ЛН на СД почти в 3 раза ниже, чем от замены ЛН на КЛЛ несмотря на то, что СД показывают высокую эффективность работы и низкое потребление электроэнергии. Такой результат связан с высокой ценой на СД.

## 2. Выводы

В ходе исследовательской работы были изучены технические аспекты различных источников света (КЛЛ, ЛН, СД).

В лабораторных условиях были определены эксплуатационные характеристики (световой поток, температура поверхности) различных типов ламп.

Было проведено социологическое исследование для определения среднего количества включений/выключений ламп в различных типах помещений жилых квартир. Социологический опрос показал, что санузел – это помещение с максимальной вероятностью включения/выключения, вне зависимости от страны проживания, а значит в этих помещениях необходимо устанавливать наиболее надежные источники света.

Была определена экономическая целесообразность бытового использования различных типов ламп. Результаты расчета говорят о том, что экономическая эф-



фективность замены ЛН на СД почти в 3 раза ниже, чем от замены ЛН на КЛЛ несмотря на то, что СД показывают высокую эффективность работы и низкое потребление электроэнергии. Такой результат связан с высокой ценой на СД.

### **Список литературы**

1. Справочная книга по электротехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 2006.
2. Выход в свет. Промышленно-строительное обозрение. 2008. № 108.
3. Рейтинг светодиодных офисных светильников // Современная светотехника. 2011. № 3. С. 7.
4. Энциклопедия «Техника». М.: Росмэн, 2006.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1984.
6. Смирнов А. Д., Антипов К. М. Справочная книга энергетика. М.: Энергоатомиздат, 1984.

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 62-503.57

### **КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛИ МНОГОСВЯЗНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ**

**Н.Р. Антропов**

**Научный руководитель канд. техн. наук Е.Д. Агафонов**

*Сибирский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. М. Ф. Решетнева*

Трубопроводные сети являются важной частью многих технологических объектов и систем водо-, тепло-, газо-, нефтеснабжения и эксплуатируются многими предприятиями коммунального хозяйства, энергетики, транспорта нефти и нефтепродуктов. В силу возрастающей сложности реальных трубопроводных систем и постепенного перехода от задач технологического проектирования к задачам эффективного управления гидравлическими сетями постоянно требуется совершенствование методов их моделирования и расчета.

Гидравлические сети представляют собой сложные многосвязные технические сооружения, состоящие из множества соединенных различным способом

труб. Основными особенностями моделей трубопроводных систем являются: большая размерность, нелинейный и многосвязный характер описывающих ее операторов, сложная топология, невозможность замеров всех параметров системы, а также наличие ненаблюдаемых и случайных факторов, влияющих на ее функционирование.

Подходы к моделированию и расчету гидравлических сетей во многом схожи с методами моделирования электрических сетей, т. к. основываются на общих законах сохранения массы и энергии, а также единых законах течения. Но в тоже время стоит отметить, что гидравлические сети – сложные многосвязные динамические системы, характеристики которых во время работы постоянно меняются по заранее неизвестному закону. В отличие от электрических цепей, чьи эксплуатационные параметры практически не отличаются от проектных, а нагрузки, напряжение и другие характеристики измеряются достаточно точно. Для трубопроводных систем значения гидравлического сопротивления, а также расходы и на ветвях, и у потребителей известны, в основном, очень приближено.

В научной и отраслевой литературе [1–4] предлагаются различные подходы к построению моделей гидравлических сетей. Зачастую речь идет о моделях, основанных на привлечении законов гидродинамики, выраженных в системах уравнений в частных производных для описания распределенных систем. Подход, который используется в таких работах, требует достаточно полной информации о физических характеристиках перекачиваемой жидкости, характере ее течения, внутреннем профиле и геометрической конфигурации трубопровода, исчерпывающей информации о функционировании насосных агрегатов. Во множестве случаев такие модели сложны в вычислительном плане, требуют учета неизвестных, часто неизмеримых или непредсказуемо меняющихся во времени и в пространстве параметров.

В качестве основного подхода к построению моделей технологических режимов в настоящее время принимается процедура создания моделей стационарного течения жидкости. Под термином «стационарная модель» подразумевается статическая модель установившегося режима технологического процесса. Модель представляет собой большую систему нелинейных алгебраических уравнений, сформированную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети [1]:

$$\begin{aligned}
 &c_{11}x_1 + \dots + c_{1n}x_n = q_1 \\
 &\dots \\
 &c_{k-1,1}x_1 + \dots + c_{k-1,n}x_n = q_{k-1} \\
 &c_{k1}s_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{kn}s_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n = h_1 \\
 &\dots \\
 &c_{n1}s_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{nn}s_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n = h_{n-k+1}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $n$  – количество участков в графе сети;  $k$  – количество узлов;  $x_j, j = 1, 2, \dots, n$  – расход по  $j$ -й трубе;  $q_i, i = 1, 2, \dots, k-1$  – приток в узле;  $s_j, j = 1, 2, \dots, n$  – гидравличе-

ское сопротивление соответствующей трубы;  $h_i$ ,  $i=1,2,\dots,n-k+1$  – сумма действующих напоров с учетом знака по всем дугам  $i$ -го контура;  $\beta$  – коэффициент в законе зависимости величины падения напора от значения расхода;  $c_{ij} = \{-1, 0, +1\}$  определяется по первому или второму закону Кирхгофа. Для второго закона Кирхгофа и для нелинейных уравнений  $c_{ij} = \{-1, +1\}$  (в зависимости от направления обхода), если  $j$ -й участок входит в цикл, соответствующий  $i$ -му нелинейному уравнению, либо  $c_{ij} = 0$ .

В основу модели гидравлической сети (1) стационарного течения жидкости положен закон гидравлического сопротивления, представляемый в виде  $h = sx^\beta$ . При этом говорится, что данный закон с высокой точностью описывает практически все режимы работы сети в зоне «вполне шероховатого трения» [2]. Однако, определение этих зон зачастую не представляется возможным ввиду сложной и многосвязной топологии трубопроводных сетей. К тому же параметры  $s_i, \beta_i$  системы уравнений (1) принимаются постоянными величинами, но на практике большинство гидравлических сетей не укладываются в такую модель, т. к. значения этих величин в процессе работы сети постоянно меняется. Эти характеристики должны считаться функциями неизвестных расходов  $x_i$  и давлений  $p_j$  (или напоров  $h_i$ ), определяющих искомое потокораспределение в гидравлической сети, т. е.

$$s_i = s_i(x_i, h_i), \beta_i = \beta_i(x_i, h_i).$$

В таких условиях нелинейные уравнения системы (1) вовсе теряют свой смысл, т. к. параметры этих уравнений определяются искомым потокораспределением. Значения этих характеристик можно определить по датчикам давлений и расходов, которыми в той или иной мере оснащены трубопроводные и другие гидравлические системы.

Таким образом, в качестве подхода к построению модели разветвленной гидравлической сети целесообразно применить комбинированный подход к описанию многосвязных систем [5].

Модель гидравлической сети в рамках такого подхода может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} c_{11}x_1 + \dots + c_{1n}x_n &= q_1 \\ \dots \\ c_{k-1,1}x_1 + \dots + c_{k-1,n}x_n &= q_{k-1} \\ x_k &= \varphi_k(X^{(k)}, H^{(k)}) \\ \dots \\ x_n &= \varphi_n(X^{(n)}, H^{(n)}) \end{aligned},$$

где  $c_{ij}, x_j, q_i$ , оговорены выше,  $X^{(j)} \subset X$ ,  $H^{(j)} \subset H$ ,  $j = \overline{k, n}$  – векторы, составленные из компонент векторов  $X, H$ , входящих в  $j$ -е уравнение, и

$$\varphi_j(X^{(j)}, H^{(j)}) = \frac{\sum_{t=1}^N h_j[t] \Phi\left(\frac{h_j - h_j[t]}{c_j^h(N)}\right) \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)} - x_i^{(j)}[t]}{c_i^x(N)}\right)}{\sum_{t=1}^N \Phi\left(\frac{h_j - h_j[t]}{c_j^h(N)}\right) \prod_{i=1}^{\dim X^{(j)}} \Phi\left(\frac{x_i^{(j)} - x_i^{(j)}[t]}{c_i^x(N)}\right)}, j = \overline{k, n} - \text{непараметри-}$$

ческие оценки качественных зависимостей.

В качестве оценки решения системы уравнений (1) принимается статистика [5]:

$$x_j = \frac{\sum_{t=1}^N x_j[t] \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_j(N)}\right)}{\sum_{t=1}^N \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{c_j(N)}\right)}, j = \overline{1, n},$$

где  $\Phi(\cdot)$  – колоколообразная (ядерная) функция;  $c_j(N), j = \overline{1, n}$  – параметры размытости, удовлетворяющие некоторым условиям сходимости [5];  $\varepsilon_j[t], j = \overline{1, l}, t = \overline{1, N}$  – компоненты рабочей выборки вектора невязок  $\varepsilon[t]$ , специальным образом сгенерированной на основе исходной выборки «вход-выход», а именно:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j[t] &= c_{j1}x_1[t] + \dots + c_{jn}x_n[t] - q_j, j = \overline{1, k-1}, \\ \varepsilon_j[t] &= c_{j1}s_1|x_1[t]|^{\beta_1-1}x_1[t] + \dots + c_{jn}s_n|x_n[t]|^{\beta_n-1}x_n[t] - h_j[t], j = \overline{k, n}. \end{aligned}$$

Таким образом, в рамках предложенного подхода представляется возможным включение в одну модель сведений, относящихся к разным уровням априорной информации; произведение расчетов, основанных на реально существующей информации об объекте; использование универсальной структуры непараметрических зависимостей, позволяющих описать практически все режимы работы сети.

### Список литературы

1. Логинов К. В., Мызников А. М., Файзуллин Р. Т. Расчет, оптимизация и управление режимами работы больших гидравлических сетей // Математическое моделирование. 2006. Т. 18. № 9. С. 92–106.
2. Мызников А. М. Моделирование и идентификация параметров сложных гидравлических сетей: дисс. канд. физ.-мат. наук. Тюмень, 2005. 116 с.
3. Мызников А. М. Уточнение коэффициентов сопротивления в сложных гидравлических сетях по результатам ограниченного числа измерений // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 3. С. 513–516.
4. Кассина Н. В. Математическое моделирование динамики гидравлических систем с использованием методов аналитической механики и теории нелинейных колебаний: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2006. 118 с.
5. Красноштанов А. П. Метод генерации решений на многосвязных системах в условиях неопределенности: дисс. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2001. 295 с.

## **РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К ВЕДЕНИЮ ПРОЕКТА, ОСНОВАННОГО НА КОМБИНАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОЛОГИЙ**

**О.В. Брюханов**

**Научный руководитель канд. пед. наук С.А. Виденин**

*Сибирский федеральный университет*

Современные компании, занимающиеся IT аутсорсинговой деятельностью при ведении проектов сталкиваются с такими проблемами, как плохое взаимодействие с заказчиком, медленная обратная связь, частое изменение требований к продукту и изменение сроков выполнения задач, сроков сдачи проекта. При этом методологии ведения проектов, которые используют в компаниях, не позволяют быстро и гибко реагировать на изменения технического задания, в частности такая методология, как экстремальное программирование, не подходит из-за отсутствия постоянного общения с заказчиком. В связи с этим в работе аутсорсинговой компании возникла необходимость разработки нового подхода к ведению проекта, основанного на комбинации различных методологий, которая будет включать в себя необходимые в данных условиях качества и правила.

Рассмотрим существующие фундаментальные методологии ведения IT-проектов, которые стали основой для разработанной нами комбинаторной вариации методик – *Scrum* и *Kanban*, для компании, работающей в условиях IT аутсорсинга.

*Kanban* – система организации производства и снабжения, позволяющая реализовать принцип «точно в срок». Система *Kanban* была разработана и впервые в мире реализована фирмой «Toyota». В 1959 году эта фирма начала эксперименты с системой *Kanban* и в 1962 году запустила процесс перевода всего производства на этот принцип. Появление термина *Kanban* связано с перечислением стандартных операций: мастера участков перечисляли выполняемые работы на бумаге и вывешивали их на видном месте рядом с такими же списками мастеров других участков. Постоянное использование философии «точно в срок» позволяет раскрыть не обнаруженные до сих пор дефекты. Так как запасы продукции и деталей могут скрывать проблемы на производстве, то при их уменьшении ежедневный контроль выявит, к примеру, неисправности или простои.

В методологии *Kanban* классически используется три правила:

Визуализируйте производство:

- разделение работы на задачи, каждую задачу можно оформлять на карточке и помещать на стену или доску;
- использование именованных столбцов, чтобы показать положение задачи в производстве.

Ограничение *WIP* (*work in progress* или работу, выполняемую одновременно) на каждом этапе производства.

Измерение время цикла (среднее время на выполнение одной задачи) и оптимизирование процесса, чтобы уменьшить это время.

Еще одна из современных методологий – это *Scrum* – методология управления проектами, активно применяющаяся при разработке информационных систем, а также для гибкой разработки программного обеспечения. *Scrum* – это набор принципов, на которых строится процесс разработки, позволяющий в жёстко фиксированные и небольшие по времени итерации, называемые спринтами, предоставлять конечному пользователю работающее ПО с новыми возможностями, для которых определён наибольший приоритет. Возможности ПО к реализации в очередном спринте определяются в начале спринта на этапе планирования и не могут изменяться на всём его протяжении. При этом строго фиксированная небольшая длительность спринта придаёт процессу разработки предсказуемость и гибкость.

В методологии *Scrum* всего три роли:

- *Scrum Master* – самая важная роль в методологии. *Scrum Master* отвечает за успех *Scrum* в проекте. *Scrum Master* является интерфейсом между менеджментом и командой.
- *Product Owner* – это человек, отвечающий за разработку продукта. Как правило, это *product manager* для продуктовой разработки, менеджер проекта для внутренней разработки и представитель заказчика для заказной разработки.
- *Team*. Команда в *Scrum* кросс-функциональна. В нее входят люди с различными навыками: разработчики, аналитики, тестировщики. Нет заранее определенных и поделенных ролей в команде, ограничивающих область действий членов команды. Размер команды ограничивается размером группы людей, способных эффективно взаимодействовать лицом к лицу.

В *Scrum* итерация называется *Sprint*. Каждый спринт представляет собой маленький «водопад» – модель процесса разработки программного обеспечения, в которой процесс разработки выглядит как поток, последовательно проходящий фазы анализа требований, проектирования, реализации, тестирования, интеграции и поддержки. В течение спринта делаются все работы по сбору требований, дизайну, кодированию и тестированию продукта. Его длительность составляет 1 месяц. Результатом *Sprint* является готовый продукт, который можно передавать заказчику (по крайней мере, система должна быть готова к показу заказчику). Короткие спринты обеспечивают быструю обратную связь (*feedback*) проектной команды с заказчиком. Заказчик получает возможность гибко управлять разработкой системы, оценивая результат спринта и предлагая улучшения к созданной функциональности. Такие улучшения попадают в очередь на разработку, приоритизируются наравне с прочими требованиями и могут быть запланированы на следующий (или на один из следующих) спринтов.

Для того чтобы определить, какая из методологий больше подходит для компании работающей в условиях IT аутсорсинга, было проведено сравнение методологий.

*Scrum* и *Kanban* имеют сходства:

1) оба являются и *Lean* (*Lean* – концепция управления, основанная на постоянном стремлении к устранению всех видов потерь), и *Agile* (*Agile* – это гибкая методология разработки, суть которой состоит в получении оперативной обратной связи и как следствие – безболезненной реакции на изменения в проекте (приоритетах, списке работ, в новых идеях заказчика));

2) оба используют вытягивающие системы планирования задач – организация потоков, когда один потребитель последовательно вытягивает поставки, осуществляемые предыдущими звеньями поставщиков, включенными в общую цепочку;

3) оба ограничивают количество незавершенных работ – количество одновременно выполняемых задач ограничено, и пока одна из задач не будет выполнена, нельзя приступать к выполнению следующей;

4) оба используют прозрачность для обеспечения улучшения процесса;

5) оба полагаются на самоорганизующиеся команды;

6) оба требуют дробления задач на более мелкие;

7) в обоих случаях план релиза постоянно оптимизируется на основе эмпирических данных (производительности/ времени выполнения задачи).

Различия представлены в таблице.

**Таблица.** Таблица различий

<i>Scrum</i>	<i>Kanban</i>
Обязательны ограничения по времени	Не подразумевает ограниченные по времени итерации
Команда обязуется выполнить конкретный объем работы за текущую итерацию	Обязательства по срокам выполнения задач опциональны
Кросс-функциональные команды являются обязательными. Кросс-функциональность – это способность выполнения командой (работником) разноплановых задач.	Могут допускаться узкопрофильные команды вместе с кросс-функциональными
Задачи должны разбиваться на более мелкие так, чтобы они были завершены в течение одного спринта	Нет каких-либо определенных размеров задач (выполнение некоторых задач может очень сильно превышать время выполнения остальных задач)
Построение диаграмм сгорания задач ( <i>burn-down</i> диаграмм) является обязательным. <i>Burndown</i> диаграммы показывают количество сделанной и оставшейся работы	Построение диаграмм не обязательно
Незавершенная работа ограничивается длиной спринта	Незавершенная работа ограничивается явно. Как показывает практика, оптимальное количество задач равно четырем
Нельзя добавлять новые задачи в текущую итерацию	Позволяет добавлять задачи, когда это возможно

На основании сходств и различий, которые описаны в таблице, было сделано предположение, которое на данный момент завершает апробацию, что *Scrum* сложно работает в условиях, когда не ясны требования даже на начале итерации, слишком часто возникают неожиданные задачи, требуется более быстрая скорость реакции, чем *t* спринта, когда нужна узкая специализация людей в команде. *Kanban* лишен минусов *Scrum*, но имеет сложность обеспечения высокой согласованности между стадиями производства продукции, имеет «плавающую» оценку сроков разработки и бюджета, а также постоянно изменяющиеся параллельно корректировке требования.

Беря во внимание опыт прошлых проектов компании «АстроСофт» и на основании анализа, было сделано предложение об опробовании комбинации *Scrum+Kanban+Scrum* на одном из проектов, где *Scrum* применятся на начальном и завершающем этапе, а *Kanban* применяется на этапе тестирования проекта. На сегодняшний момент проект завершил этап *Scrum+Kanban* и переведен обратно в стадию *Scrum*, так как заказчик проанализировал ИС и указал на недочеты, которые требуется исправить и добавил задачи по реализации нового функционала.

На основании эксперимента был сделан вывод, что применение «чистого» *Scrum* или *Kanban* в компании, ведущей IT аутсорсинг, является неэффективным решением, т. к. эти методологии не могут эффективно работать в условиях частого изменения технического задания, изменения сроков выполнения задач, изменения сроков сдачи проекта, плохого взаимодействия с заказчиком и медленной обратной связи.

Проводимый нами эксперимент подтвердил наши предположения об эффективности комбинирования методологий *Scrum* и *Kanban*, объединения их плюсов: *Kanban* эффективно работает при плохом взаимодействии с заказчиком, *Scrum* благодаря спринтам позволяет четко определять сроки выполнения задач и более эффективное использование человеческих ресурсов. Объединение *Scrum* и *Kanban* позволит значительно сократить риск получения продукта, который будет не устраивать заказчика, а также срыв сроков сдачи проекта и увеличение стоимости.

### **Список литературы**

1. The Productivity Press Development Team, *Kanban for the Shopfloor* : пер. с англ. / В. Болтрукевич, И. Попеско. М.: Изд-во Москова, Институт комплексных стратегических исследований, 2007. 126 с.

2. Книберг Х., Скарин М. *Kanban и Scrum: выжимаем максимум*: пер. выполнен сообществом *Agile Ukraine*. Изд-во InfoQ.com, 2010. 78 с.



## **РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБМЕНА ЗАКРЫТОЙ ДОКУМЕНТАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ПО ПРОМЫШЛЕННЫМ СЕТЯМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

**О.В. Дрозд**

**Научный руководитель канд. техн. наук Д.В. Капулин**

*Сибирский федеральный университет*

Широкое распространение технологий беспроводного *Ethernet* в корпоративном секторе и в секторе электронных устройств для частного пользования закономерным образом привело к росту внимания к этим технологиям со стороны производителей и интеграторов автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Применительно к АСУ ТП, беспроводные сети обладают такими преимуществами, как возможность расположения устройств приема-передачи данных в труднодоступных местах, оперативность и удобство развертывания и обслуживания системы, возможность добавления и исключения количества устройств в сети.

Кроме того, внедрение беспроводных устройств контроля параметров открывает новые области для применения систем автоматики, контроля и управления, такие как обеспечение доступа к системам объекта, контроль периметра объекта, наблюдение за перемещениями персонала на территории предприятия, автоматизация контроля проведения инспекций и технического обслуживания, контроль экологических параметров окружающей среды.

При этом, по сути, единственным сдерживающим фактором для широкого распространения беспроводных сетей, в частности, сетей стандарта *IEEE 802.11*, является низкий уровень защищенности каналов связи и недостаточная надежность используемых в настоящий момент алгоритмов шифрования данных, таких как *Triple-DES* и *AES*.

Цель данной работы была поставлена следующим образом: необходимо обеспечить безопасную передачу данных по промышленным беспроводным сетям передачи данных с использованием российских стандартов шифрования данных при работе с устройствами (в том числе и с мобильными устройствами) сторонних производителей. Задачей, поставленной в ходе данной работы, является разработка и реализация криптографического блока на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) с помощью языка описания аппаратуры *Verilog*, разработка отладочного комплекса с использованием серийного комплекта разработчика на базе ПЛИС *XilinxSpartan-6* и набора отладочных модулей, представляющих собой ключевые узлы конечного устройства.

На рис. 1 изображена структурная схема устройства обмена закрытой документальной информацией. Для защиты канала передачи данных необходимо как

минимум два подобных устройства, одно из которых связано с передатчиком и выполняет шифрование передаваемых данных, второе устройство связано с приемником и предназначено для дешифрования полученных данных. При этом данные устройства аналогичны и взаимозаменяемы.

В состав устройства (1) входят следующие компоненты: проводной *USB* интерфейс (2); преобразователь интерфейсов *USB/UART* (3); криптографический блок на базе ПЛИС (4); радиointерфейс *IEEE 802.11* (5) с встроенной радиоантенной (7); энергонезависимая память (8); программатор энергонезависимой памяти (9); проводной *RS-232* интерфейс (10); аккумуляторная батарея (11), источник электропитания (12); переключатель режимов работы (13), генератор тактовых импульсов (14). Также возможно подсоединение внешней радиоантенны (6).

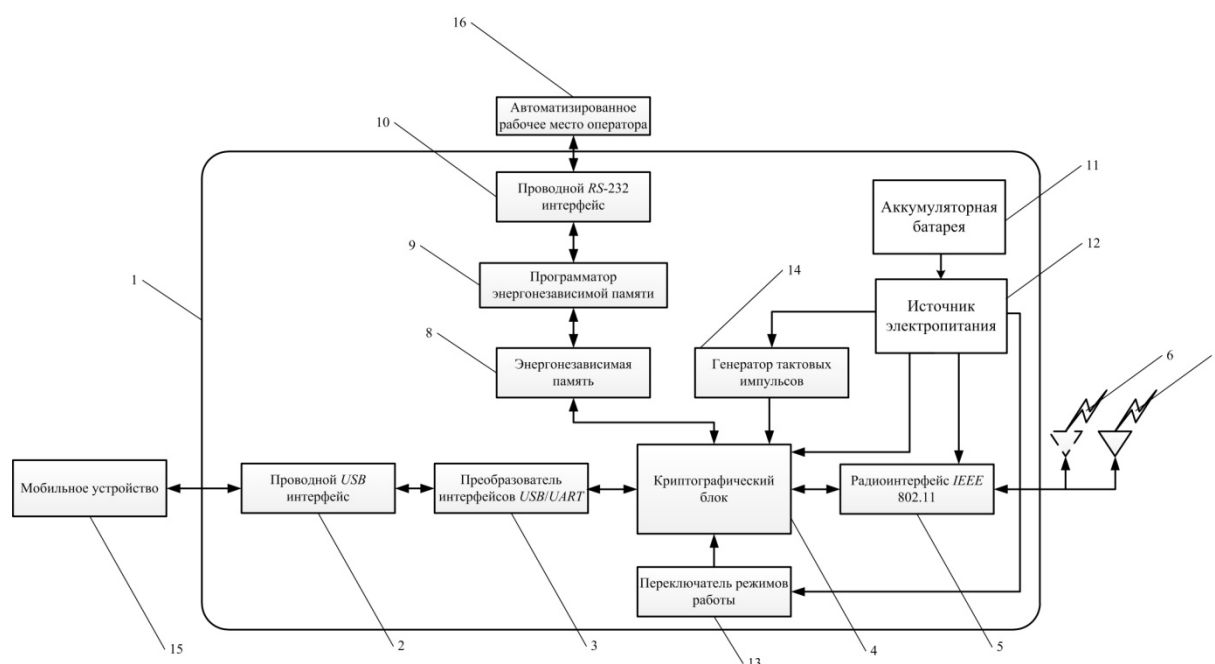


Рис. 1. Структурная схема устройства обеспечения защищенной передачи данных

Отладочный комплекс (рис. 2) состоит из серийного комплекта разработчика на базе ПЛИС *XilinxSpartan-6* в виде отладочной платы и четырех отладочных модулей, представляющих собой ключевые узлы конечного устройства. В состав отладочного комплекса входят модуль проводного интерфейса *USB*; модуль радиointерфейса *IEEE 802.11*; модуль, включающий в себя ключевое запоминающее устройство (КЗУ) и адаптер перепрограммирования КЗУ; модуль, включающий в себя аккумуляторную батарею, блок питания, блок зарядки аккумуляторной батареи.

Модуль проводного интерфейса основан на преобразователе интерфейсов *USB-UARTFT232RL*. Модуль радиointерфейса основан на модуле радиointерфейса *WizFi 220* со встроенной антенной. Также к данному модулю возможно подключение внешней антенны. В качестве ключевого запоминающего устройства используется микросхема электрически стираемого перепрограммируемого по-

стоянного запоминающего устройства 24LC02 емкостью 2048 бит, что позволяет хранить восемь секретных ключей по 256 бит каждый. В качестве аккумуляторных батарей используются два литий-ионных аккумулятора форм-фактора 18 650 емкостью по 3200 мА·ч, для управления процессом зарядки аккумуляторных батарей используется контроллер заряда bq24002, для преобразования напряжения питания используются два преобразователя напряжения MAX1674.



Рис. 2. Структурная схема отладочного комплекса

В состав криптографического блока входят два программных приемопередатчика стандарта *UART*, обеспечивающие взаимодействие между криптографическим блоком и внешними устройствами, управляющий процессор и блоки шифрования и дешифрования данных, реализующие соответствующие функции алгоритма криптографического преобразования ГОСТ 28147-89. Структура криптографического блока представлена на рис. 3.

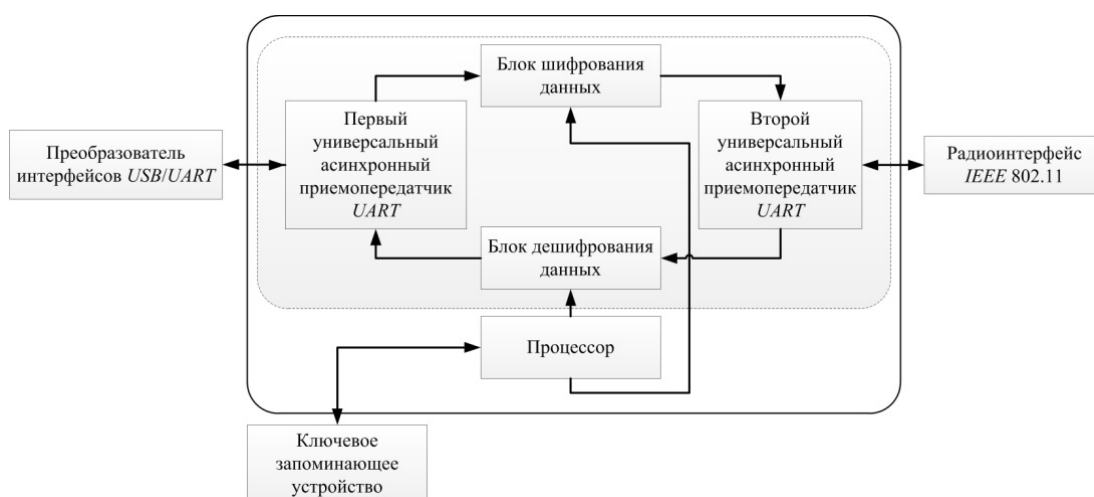


Рис. 3. Структурная схема криптографического блока

Криптографический блок выполнен на базе ПЛИС и обеспечивает реализацию всех основных режимов работы шифроалгоритма ГОСТ 28147-89: режим простой замены, режим гаммирования, режим гаммирования с обратной связью, режим выработки имитовставки. Реализация режимов работы шифроалгоритма выполнена на языке описания аппаратуры *Verilog*. Для аппаратной реализации рекомендуется ПЛИС *Spartan-6* (производитель *Xilinx*, США).

В табл. 1 представлены некоторые параметры реализации шифроалгоритма ГОСТ 28147-89 на базе ПЛИС, в данном случае представлены параметры реализации 32-х раундов шифрования данных в режиме простой замены.

**Таблица 1.** Параметры реализации шифроалгоритма ГОСТ 28147-89 на базе ПЛИС

Семейство ПЛИС	Модель ПЛИС	Логических ячеек	Задержка, нс	Потребляемая мощность	Частота, МГц	Пропускная способность, Мб/с
<i>Artix-7</i>	<i>XC7A200</i>	3808	131,0860	0,0730	7,6286	61,0286
<i>Spartan-6</i>	<i>XC6SLX25</i>	3808	161,3270	0,0290	6,1986	49,5887
	<i>XC6SLX150</i>			0,1130		

Моделирование устройства в среде *Simulink* показало, что устройство обеспечивает надежную обработку и передачу данных в совокупности с такими интерфейсами, как *IEEE 802.11ac*, *FastEthernet*, *GigabitEthernet*. В ходе моделирования устройство было представлено в виде трехканальной (три потока шифрования) системы массового обслуживания. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты моделирования устройства для обмена закрытой документальной информацией

Стандарт	Время работы СМО, мкс	Поступило заявок	Обслужено заявок	Не обслужено заявок
802,11g	100	56	56	0
802,11n	100	156	156	0
802,11ac	100	1364	1362	2
<i>GigabitEthernet</i>	100	1040	1038	2
<i>FastEthernet</i>	100	104	104	0
<i>USB 1.0</i>	100	12	12	0
<i>USB 2.0</i>	100	498	497	1
<i>USB 3.0</i>	100	1915	1872	43

Также возможно использование системы с устройствами с интерфейсом *USB 3.0* при использовании промежуточных накопителей для поступающих пакетов данных.

Таким образом, предлагаемое устройство для обмена закрытой документальной информацией позволяет решать задачу обеспечения защищенной передачи данных по промышленным сетям беспроводной передачи данных с использованием стандарта шифрования данных ГОСТ 28147-89, а также способно обеспечивать защиту беспроводной передачи данных между любыми другими устройствами, поддерживающими интерфейсы *USB* и *Wi-Fi*.

# ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 666

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КЕРАМИЧЕСКОМ СЫРЬЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

**А.А. Дорошенко**

**Научный руководитель д-р техн. наук А.Е. Бурученко**

*Сибирский федеральный университет*

Для того, чтобы повысить качество керамических изделий, требуется учитывать проходящие в них физико-химические процессы при их термической обработке. Зная, какие процессы проходят при тех или иных температурах, можно подобрать правильные режимы обжига, обеспечивающие необходимые свойства готовым изделиям.

Для определения таких процессов применяются различные методы: дифференциальный термический, рентгеноструктурный, микроскопический и др. анализы. Но такие методы не дают полную информацию о процессах, происходящих в процессе обжига, т. к. исследуются образцы после термической обработки.

В нашем случае для исследования электропроводности использовались легкоплавкая Кубековская и тугоплавкая Кантатская глины. Основными минералами, образующими глину, являются каолинит, монтмориллонит, кварц, альбит и ортоклаз. Химический состав глин Кантатского и Кубековского месторождений представлен в таблице.

**Таблица**

Сырье	Массовое содержание, %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	п.п.п.
Глина Кантатского месторождения	61,79	23,20	0,34	0,27	0,15	1,43	1,24	–	11,57
Глина Кубековского месторождения	56,4	13,8	5,78	7,18	2,3	1,9	1,25	–	10,7

Метод измерения электропроводности позволяет исследовать физико-химические процессы и структурные изменения, происходящие в образцах непосредственно при обжиге. Для этого формуется керамический образец цилиндри-

ческой формы, в который вставлены электроды, присоединённые к измерительной установке. Далее производится равномерный нагрев образца от комнатной температуры до 1100 °С – 1200 °С, и непрерывно измеряется сопротивление на установке. Затем строится график зависимости удельного сопротивления от температуры (рис. 1, 2).

Как видно из рис. 1, с повышением температуры от 25 °С до 270 °С у Кубековской глины резко увеличивается удельное сопротивление, что объясняется выходом ионов воды (выход механически примешанной воды). Далее отличительной является температура 360 °С, после которой снижается скорость уменьшения удельного сопротивления, что объясняется уменьшением числа носителей ионов и замедлением скорости их диффузии. Интервал 360 °С – 480 °С объясняется выходом ионов межплоскостной воды гидромусковита. При 560 °С – 720 °С происходит распад кристаллической решетки каолинита. При 720 °С – 780 °С распадается кристаллическая решетка гидромусковита и образовывается анортит, что подтверждается кривыми изменения интенсивности аналитических линий минералов, слагающих глину Кубековского месторождения (рис. 2).

На промежутке от 900 °С до 940 °С начинается процесс кристаллизации продуктов распада каолинита, отраженный слабым экзотермическим эффектом (рис. 3). Начиная с 940 °С идёт процесс плавления альбита, в жидкой фазе которого растворяется кварц и формируется анортит, что обуславливает снижение скорости уменьшения удельного сопротивления (рис. 2).

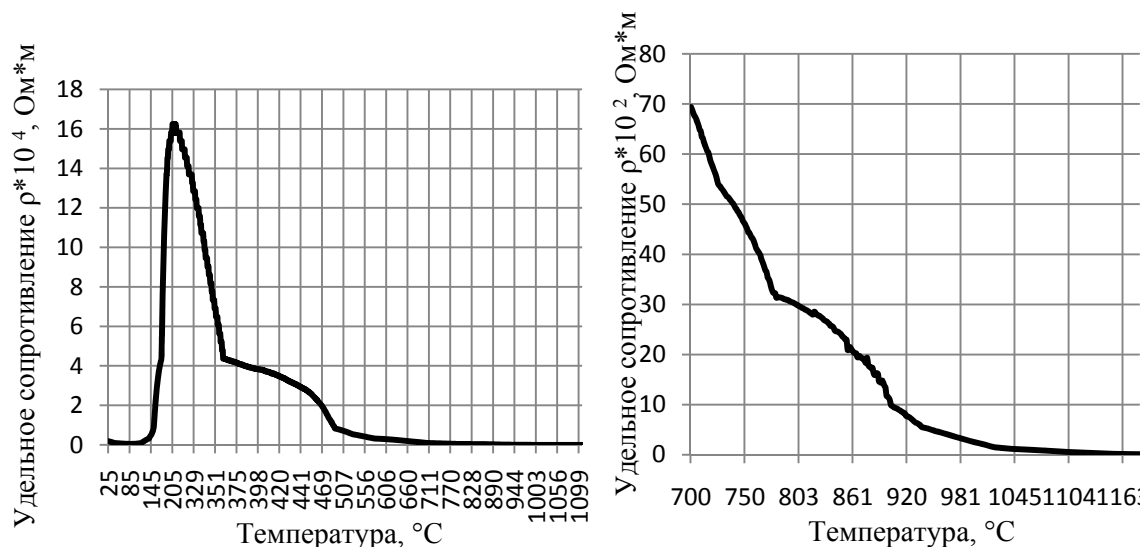


Рис. 1. Графики зависимости удельного сопротивления от температуры нагрева для глины Кубековского месторождения: а – 25 °С – 1180 °С б) 700 °С – 1180 °С

Исследование изменения электропроводности глины Кантатского месторождения в процессе обжига показало (рис. 4), что от 25 °С – 320 °С идёт аналогичный процесс выхода механически примешанной воды. При 320–380 °С удельное сопротивление уменьшается за счёт увеличения числа носителей ионов в результате усиления их флуктуаций. Начиная с 380 °С их количество уменьшается.

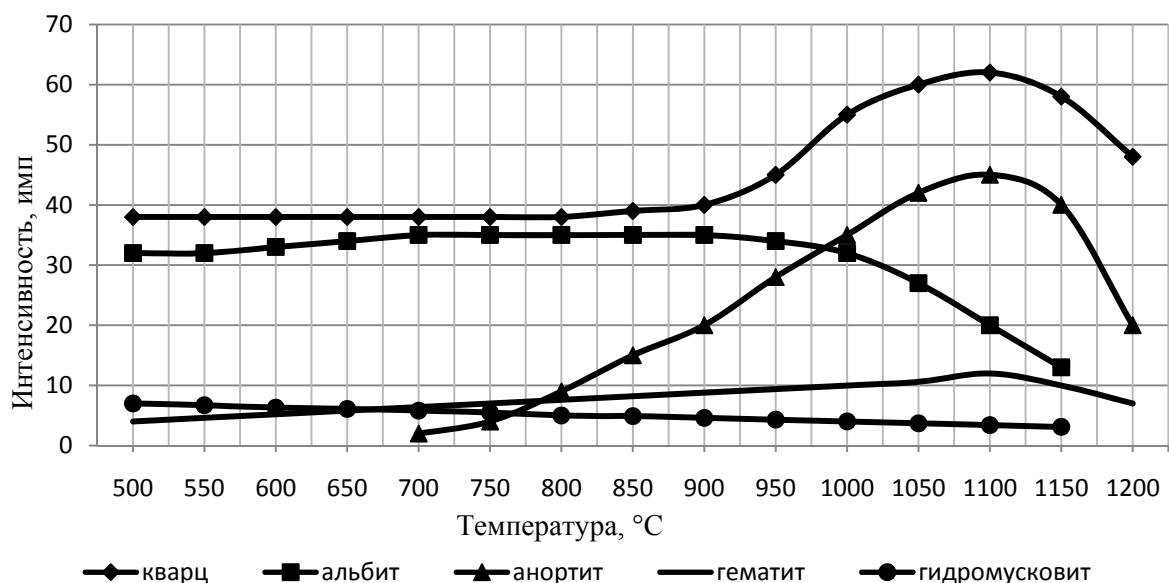


Рис. 2. График изменения линий интенсивности пиков минералов глины Кубековского месторождения

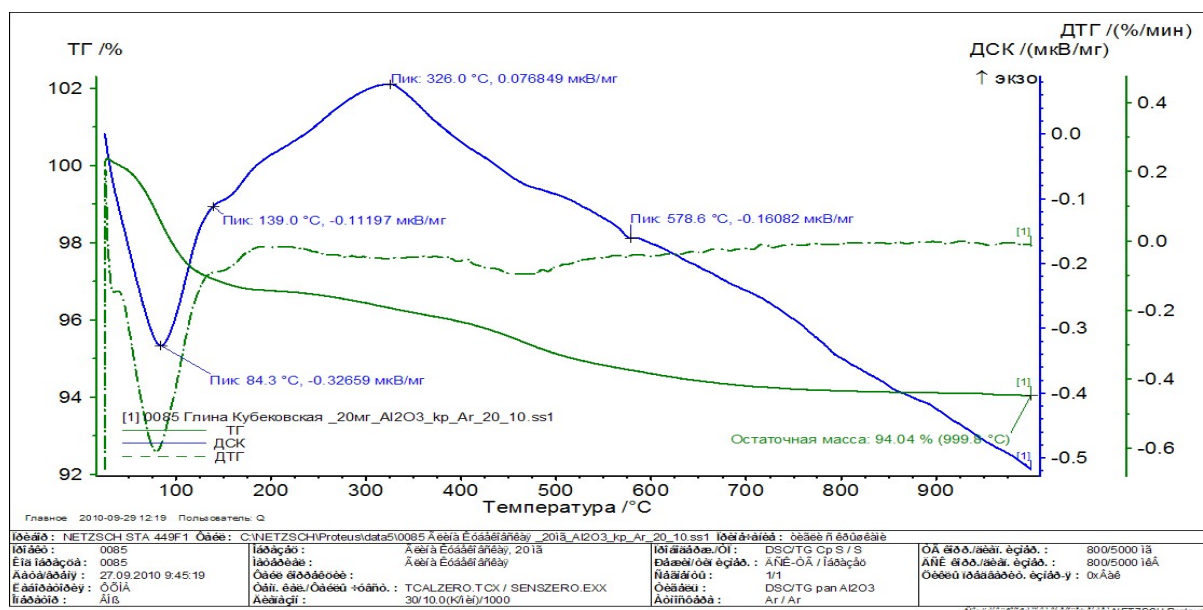


Рис. 3. Дифференциальный термический анализ глины Кубековского месторождения

В интервале 440 °C – 570 °C происходит распад кристаллической решетки каолинита (рис. 5). При 570 °C – 750 °C распадается кристаллическая решетка монтмориллонита. Интервал 750 °C – 820 °C соответствует окончательному разрушению кристаллической решетки монтмориллонита.

При 820 °C – 915 °C происходит процесс разложения карбонатов и формирования структуры анортита, что сказывается на снижении скорости изменения удельного сопротивления. При нагревании свыше 915 °C начинает образовывать-

ся жидкая фаза, в которой формируются кристаллы муллита, которые уже фиксируются при температуре 1100 °С (рис. 6).

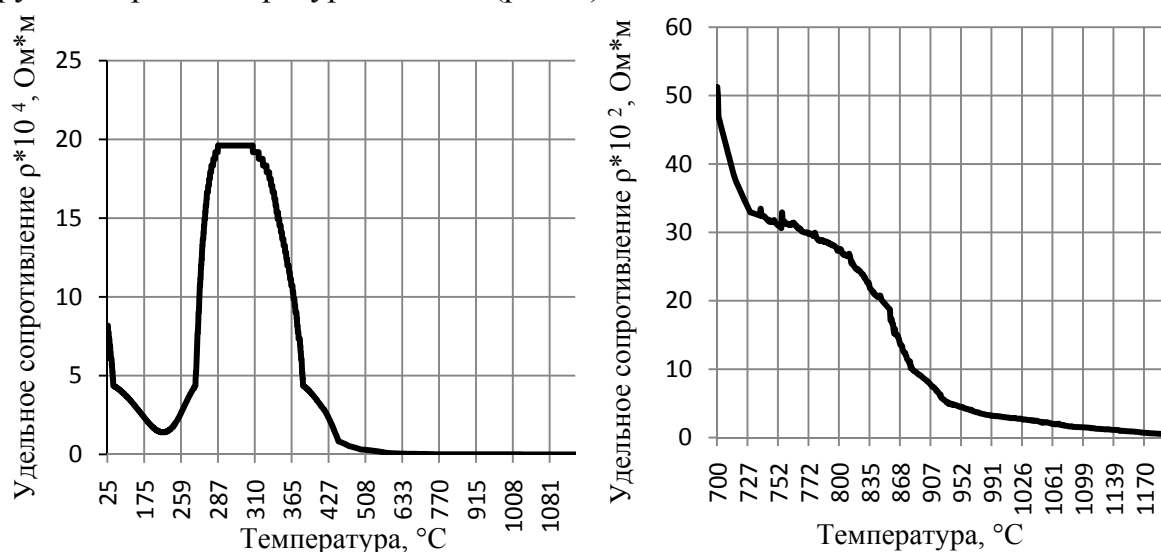


Рис. 4. Графики зависимости удельного сопротивления от температуры нагрева для глины Канатского месторождения а) 25 °С – 1180 °С б) 700 °С – 1180 °С

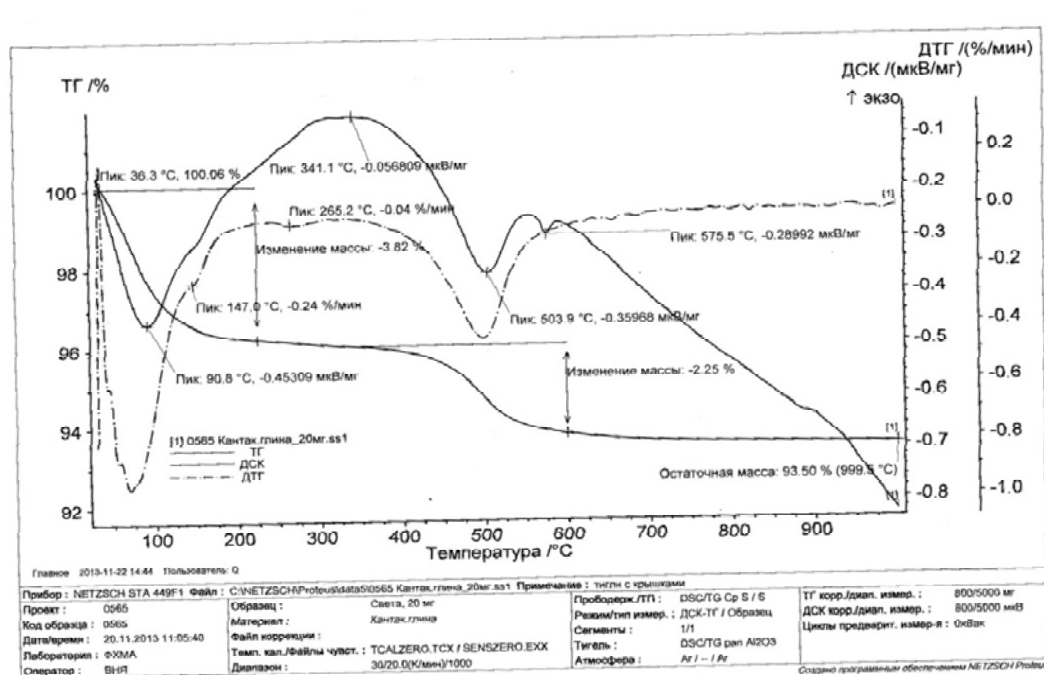


Рис. 5. Дифференциальный термический анализ глины Канатского месторождения



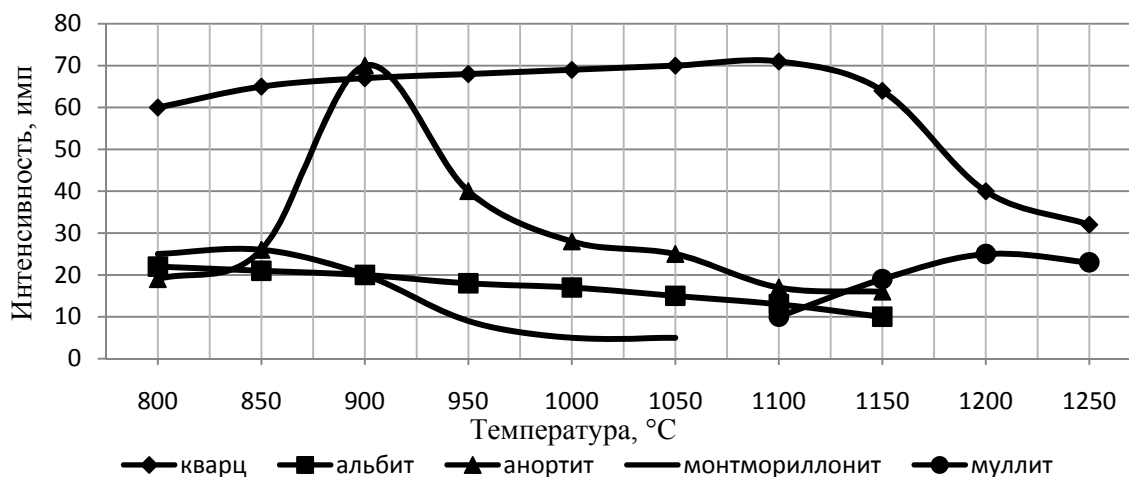


Рис. 6. График изменения линий интенсивности пиков минералов глины Кантатского месторождения

Таким образом, метод измерения изменения электропроводности керамических масс в процессе термической обработки позволяет фиксировать интервалы выхода механически примешанной воды, межплоскостной воды, распад кристаллических решеток минералов, образование жидкой фазы и формирование кристаллических решеток новых минералов, что дает возможность установить оптимальный режим обжига, обуславливающий получение изделий с высокими физико-механическими свойствами.

УДК 538.94

## ПОВЕРХНОСТЬ ФЕРМИ ЭЛЕКТРОННОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В РАМКАХ КЛАСТЕРНОЙ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ВЕСОМ

**В.И. Кузьмин**

**Научный руководитель д-р. физ.-мат. наук С.Г. Овчинников,  
научный соруководитель канд. физ.-мат. наук С.В. Николаев**

*Сибирский федеральный университет*

Как известно, природа носителей заряда в купратных сверхпроводниках p- и n-типа носит различный характер, что приводит к асимметрии фазовой диаграммы для двух данных типов соединений. Сверхобменное взаимодействие d-ионов в n-купратах слабо подавляется с допированием вследствие механизма диамагнитного разбавления. Как результат, в сверхпроводниках n-типа антиферро-

магнитные корреляции вблизи оптимального допирования имеют большую длину (порядка 400 единиц постоянных решетки). В отличие от дырочных купратных сверхпроводников, в которых псевдощель открывается в области точки  $(\pi, 0)$ , для соединений *n*-типа характерно подавление спектрального веса в «горячих» точках, лежащих на пересечении поверхности Ферми с границей антиферромагнитной зоны Бриллюэна. Данный эффект был воспроизведен в результате теоретических исследований электронных сверхпроводящих купратов из первых принципов [1, 2].

Ключевую роль при описании электронной структуры ВТСП купратов играет учет антиферромагнитных корреляций на фоне сильных локальных электронных корреляций. Два режима антиферромагнитных корреляций – спиновая жидкость и антиферромагнитный металл – были рассмотрены в работе [1], где была рассчитана эволюция закона дисперсии и поверхности Ферми с допированием для электронного сверхпроводника SCCO. В первом случае применялась самосогласованная процедура учета ближнего порядка, во втором использовалось приближение Хаббард-I в рамках LDA+GVB подхода для учета дальнего порядка. Лучшее описание было получено во втором случае: полученные данные оказались в качественном согласии с данными ARPES-экспериментов, однако данный подход не позволил воспроизвести распределение спектрального веса на поверхности Ферми.

Приближение Хаббард-I не позволяет учесть ближние магнитные корреляции. В силу этого мы применяем кластерную теорию для включения ближнего порядка в рассмотрение. В настоящей работе поведение, характерное для электронных купратных сверхпроводников, исследуется в рамках кластерной теории возмущений с контролируемым спектральным весом NC-CPT [3] в  $t$ - $t'$ - $t''$ - $J$ - модели. NC-CPT, как и CPT, предполагает пертурбативное рассмотрение дальних взаимодействий и точный учет ближних путем точной диагонализации кластера. Применение техники X-операторов позволяет контролировать полный спектральный вес квазичастиц на всех этапах вычислений. Наш подход позволил наблюдать в  $t$ - $t'$ - $t''$ - $J$ - модели линии нулей функции Грина. Впервые линии нулей наблюдались в модели Хаббарда методом CDMFT [4, 5]. Используемая нами модель является слишком грубой, чтобы претендовать на хорошее согласие с экспериментальными данными, но подходящей, чтобы описать характерные эффекты, наблюдаемые для ВТСП-купратов *n*-типа. В частности, мы показываем, как линии нулей функции Грина могут влиять на распределение спектрального веса и вызывать эффект появления «горячих» точек.

Гамильтониан  $t$ - $t'$ - $t''$ - $J$ -модели в дырочном представлении имеет вид:

$$H = \sum_{i \neq j, \sigma} t_{ij} (c_{i\sigma}^+ c_{j\sigma} + c_{j\sigma}^+ c_{i\sigma}) + J \sum_{i \neq j} \left( \vec{S}_i \vec{S}_j - \frac{n_i n_j}{4} \right). \quad (1)$$

Квазифермиевские операторы  $c_{i\sigma}^+$  и  $c_{i\sigma}$  здесь действуют в ограниченном гильбертовом пространстве с исключенными двухчастичными состояниями,  $n_{i\sigma} = c_{i\sigma}^+ c_{i\sigma}$  – оператор числа дырок на узле,  $\sigma$  – проекция спина,  $\vec{\sigma} = -\sigma$ ,  $J$  – обменный интеграл,  $t_{ij}$  – интеграл перескока с узла  $i$  на узел  $j$ . Учитываются перескоки  $t$  между ближайшими соседями,  $t'$  – между вторыми и  $t''$  – между третьими.

Идеология кластерной теории возмущений предусматривает три основных шага:

- 1) исходная решетка разбивается на кластеры;
- 2) вычисляется функция Грина кластера;
- 3) восстанавливается функция Грина на решетке в результате рассмотрения межкластерного взаимодействия как возмущения.

Процедура разбиения решетки на кластеры и анализ возможных покрытий для модели Хаббарда подробно описаны в работе [3]. Мы действуем аналогичным образом для  $t$ - $t'$ - $t''$ - $J$ - модели, покрывая решетку трансляциями кластера  $2 \times 2$ .

Слагаемые в гамильтониане (1) перегруппируем так, чтобы отделить внутр-рикластерные взаимодействия от межкластерных. В результате получим:

$$H = \sum_f h^c(f) + \sum_{f, \Delta i} h^{cc}(f, f + \Delta i), \quad (2)$$

где  $f$ ,  $f + \Delta i$  и  $f + \Delta j$  – кластерные индексы.

Проведем процедуру точной диагонализации гамильтониана  $h^c(f)$  и на базисе его собственных состояний построим X-операторы Хаббарда  $|p\rangle\langle q|$ . Функция Грина, определенная на исходной решетке и связанная с функцией Грина на X-операторах  $D_{\alpha\beta}(\tilde{\mathbf{k}}, \omega) = \langle\langle X_{\tilde{\mathbf{k}}}^\alpha | X_{\tilde{\mathbf{k}}}^{-\beta} \rangle\rangle_\omega$  соотношением (вектор  $\tilde{\mathbf{k}}$  принадлежит редуцированной зоне Бриллюэна)

$$G_\sigma(\mathbf{k}, \omega) = \frac{1}{N_c} \sum_{\alpha\beta} \sum_{i,j=1}^{N_c} \gamma_{\sigma i}(\alpha) \gamma_{\sigma j}(\beta) e^{-ik(r_i - r_j)} D_{\alpha\beta}(\mathbf{k}, \omega), \quad (3)$$

рассчитывается нами в рамках теории возмущений в приближении Хаббард-I в терминах X-операторов. В (3) вектор  $\mathbf{k}$  принадлежит исходной зоне Бриллюэна,  $N_c$  – количество узлов в кластере, равное четырем в нашем случае,  $\gamma_{\sigma i}(\alpha)$  – матричные элементы оператора  $c_{i\sigma}$  в представлении кластерных операторов Хаббарда,  $\alpha$  и  $\beta$  – корневые вектора.

Аналогично работе [3] введем  $f$ -фактор для контроля полного спектрального веса фермиевских квазичастиц:

$$f \equiv \frac{\sum_\alpha |\gamma_{i\sigma}(\alpha)|^2 F(\alpha)}{(1+n)/2}, \quad (4)$$

где  $n$  – степень электронного допирования,  $F(\alpha) \equiv F(p, q) = \langle X^{pp} \rangle + \langle X^{qq} \rangle$  – фактор заполнения.

Спектральная функция

$$A_\sigma(k, \omega) = -\frac{1}{\pi} \lim_{\eta \rightarrow +0} (\text{Im } G_\sigma(k, \omega + i\eta + \mu)) \quad (5)$$

удовлетворяет соотношению

$$\int d\omega A_{\sigma}(k, \omega) = \left\langle \left[ c_{k\sigma}, c_{k\sigma}^{\dagger} \right]_{+} \right\rangle = f(1+n)/2, \quad (6)$$

где  $n$  – степень электронного допирования. При учете всех корневых векторов  $\alpha$  в (4)  $f = 1$ . В наших вычислениях не учитывается часть переходов таким образом, что учет оставшихся приводит к выполнению условия  $f \geq 0.995$ , что позволяет существенно сократить время вычислений без значительного влияния на конечный результат.

Допирование электронами осуществляется по схеме, аналогичной приведенной в работе [3]. Для кластера с четырьмя узлами схема выглядит следующим образом. Гильбертово пространство состояний кластера разбивается на сектора с определенным числом дырок в кластере  $N$ . В случае половинного заполнения  $N = 4$ . Далее определяются нижние энергетические термы в секторах гильбертова пространства с  $N = 4$  и  $N = 3$ , и устанавливается вероятность их заселения в зависимости от величины электронного допирования на узел  $n$ , как  $1-x$  и  $x$ , соответственно. В данном случае четырехузельного кластера  $x = 4n$  и в дальнейших расчетах мы ограничиваемся максимальной величиной допирования  $n = 0.25$ . Для увеличения степени допирования необходимо учесть следующие сектора гильбертова пространства.

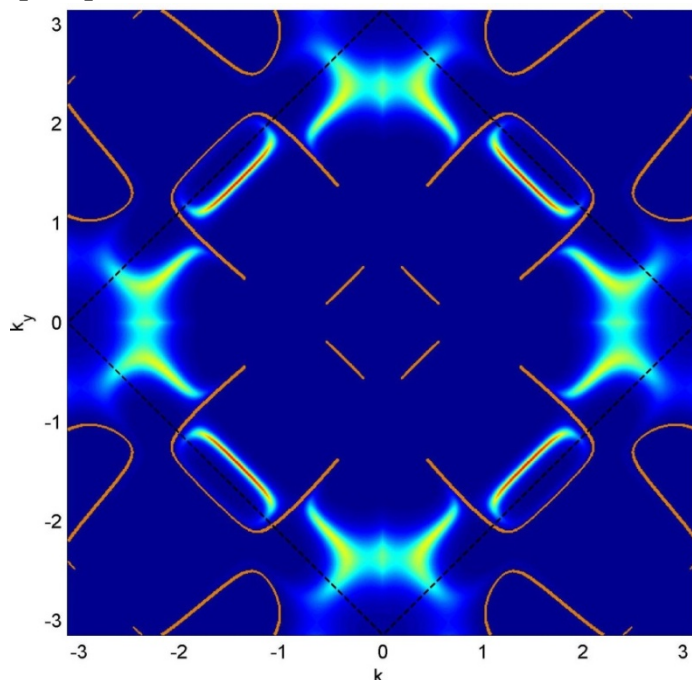


Рис. Распределение спектрального веса при энергии Ферми в первой зоне Бриллюэна для значений параметров модели  $t = -0.5, t' = 0.02, t'' = -0.07, J = 0.195$  при допировании  $n = 0.14$ . Тонкими оранжевыми кривыми изображены линии нулей, штриховыми черными прямыми – границы антиферромагнитной зоны Бриллюэна

На рисунке представлены результаты численных расчетов в рамках NC-CPT для параметров  $t = -0.5, t' = 0.02, t'' = -0.07, J = 0.195$  вблизи оптимального допирования. Рассчитанная нами поверхность Ферми имеет качественное сходство с результатами работ [1, 2], образуя карманы вблизи точки  $(\pi, 0)$  и  $(\pi/2, \pi/2)$ . Распределение спектрального веса на поверхности Ферми имеет неравномерный характер и представляет собой результат весьма сложного взаимного расположения и аннигиляции полюсов и нулей функции Грина. Вблизи тех областей обратного пространства, где линии нулей пересекают границы антиферромагнитной зоны Бриллюэна, спектральный вес стремится к нулю, формируя появление «го-

рячих» точек. Распределение спектрального веса в кармане вокруг точки ( $\pi/2$ ,  $\pi/2$ ) имеет максимум в области, более близкой к точке (0,0), что объясняется близким положением линии нулей к противоположной части кармана.

Таким образом, наша кластерная теория позволила нам описать распределение спектрального веса, характерное для высокотемпературных купратных сверхпроводников n-типа вблизи оптимального допирования, и показать, что наблюдаемая экспериментально поверхность Ферми может рассматриваться как результат нетривиального взаимного расположения полюсов и нулей функции Грина.

### **Список литературы**

1. Korshunov M. M. et al., J. Phys.:Condens. Matter 22, 015701 (2010).
2. Weber C., Haule K., Kotliar G. Phys. Rev. B 82, 125107 (2010).
3. Николаев С. В., Овчинников С. Г. ЖЭТФ. 141, 135 (2012).
4. Stanescu T. D. and Kotliar G. Phys. Rev. B 74, 125110 (2006).
5. Sakai S., Motome, Y. and Imada M. Phys. Rev. Lett. 102, 056404 (2009).

УДК 548.1:537.226.4

## **ВЕДУЩИЙ СТРУКТУРНЫЙ ПАРАМЕТР И ПРОГНОЗ СИНТЕЗА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ РЯДА ДВОЙНЫХ МОЛИБДАТОВ $ALn(MoO_4)_2$ . ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ $\beta$ -ФАЗЫ $RbSm(MoO_4)_2$**

**Н.Н. Тачеева**

**Научные руководители д-р. физ.-мат. наук С.В. Мисюль,  
канд. физ.-мат. наук М.С. Молокеев**

*Сибирский федеральный университет*

Рассмотрены структуры двойных молибдатов с общей формулой  $ALn(MoO_4)_2$  ( $A = Li - Cs, Cu, Ag$ ;  $Ln = La - Lu$ ). Показано, что отношение радиусов  $R_{Ln}/R_A$  ионов  $Ln$  и  $A$  является ключевым фактором, определяющим симметрию и структуру перспективных кристаллов двойных молибдатов  $ALn(MoO_4)_2$ . По данным рентгеновского эксперимента от порошковых образцов определена структура  $\beta$ -фазы  $RbSm(MoO_4)_2$ . Уточнение профильных и структурных параметров проводилось по методике, реализованной в программе TOPAS 4.2, ориентированной на минимизацию по всему профилю рентгенограммы разности между значениями производной от рассчитанной и экспериментальной интенсивностей рентгеновского излучения.

### **Введение**

Кристаллы молибдатов представляют обширный класс материалов, имеющих широкое применение в лазерной физике и акустооптике. Среди таких соеди-

нений выделяются двойные молибдаты с общей формулой  $ALn(MoO_4)_2$  ( $A = Li - Cs, Cu, Ag; Ln = La - Lu$ ), которые получили применение как нелинейно-оптические среды, используемые для управления пространственными, временными и спектральными характеристиками лазерного излучения.

Однако кристаллические структуры большинства двойных молибдатов попрежнему неизвестны или слабо изучены. Можно говорить только о некоторых из двойных молибдатов, чьи структуры определены с достаточной для современного приложения точностью. Поэтому паспортизация и определение структур соединений из этого ряда в настоящее время актуальны.

Цель настоящего исследования заключалась в выявлении основного (ведущего) параметра, определяющего структурные характеристики (симметрию, параметры кристаллической ячейки) ранее синтезированных и известных двойных молибдатов и структуру низкотемпературной (при 293 К)  $\beta$ -фазы кристалла  $RbSm(MoO_4)_2$ .

### 1. Определение структуры $\beta$ -фазы кристалла $RbSm(MoO_4)_2$

Кристаллы  $\beta$ -фазы  $RbSm(MoO_4)_2$  выращены и любезно предоставлены для исследований сотрудником Байкальского института природопользования СО РАН (г. Улан-Удэ) О. Д. Чимитовой.

Рентгенограммы (рис. 1)  $\beta$ -фазы  $RbSm(MoO_4)_2$  получены на порошковом дифрактометре, Bruker D8 Advance, в геометрии Брэгга-Брентано с установленным на гониометре линейным детектором Vantec ( $CuK\alpha$  – излучение). Для индирования рентгенограммы использовалась широко распространённая математическая программа ИТО. По результатам, полученным в ходе индирования рентгенограммы  $\beta$ -фазы  $RbSm(MoO_4)_2$ , и, следуя погасаниям рентгеновских рефлексов, определена пространственная группа –  $Pbcn$  ( $Z = 4$ ) с параметрами примитивной кристаллической ячейки:  $a = 5,142 \text{ \AA}$ ,  $b = 18,817 \text{ \AA}$ ,  $c = 8,162 \text{ \AA}$ .

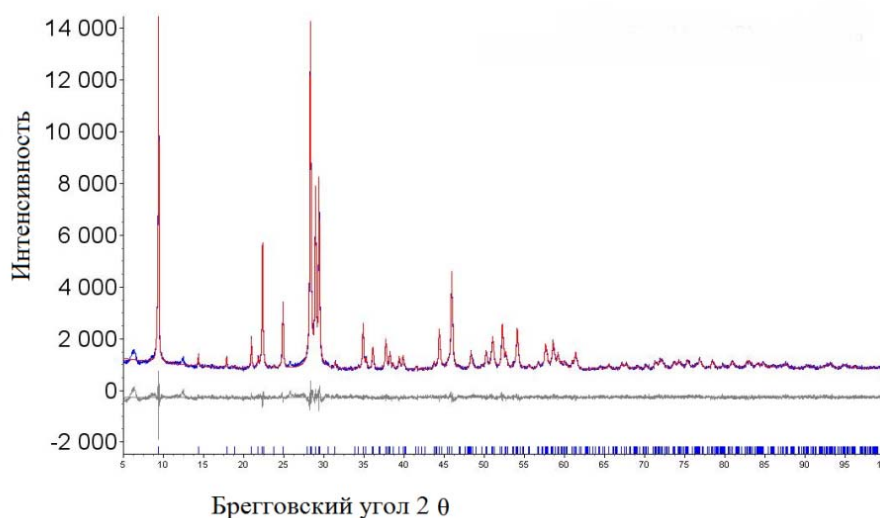


Рис. 1. Экспериментальная (красная линия), теоретическая (синяя линия) и разностная (черная линия) рентгенограммы  $\beta$ -фазы кристалла  $RbSm(MoO_4)_2$  при 293 К ( $CuK\alpha$  – излучение)

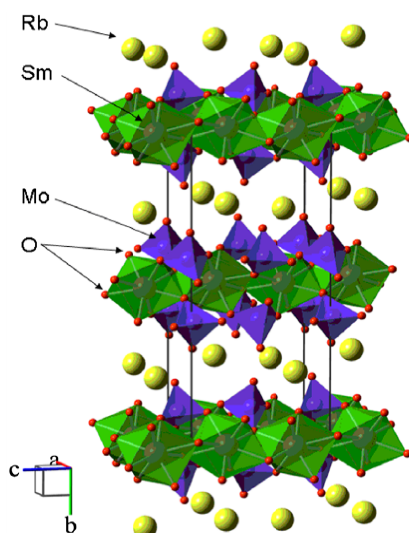
Уточнение профильных и структурных параметров проводилось по методике, реализованной в комплексе программ TOPAS 4.2, ориентированной на минимизацию по всему профилю рентгенограммы разности между значениями производной от рассчитанной и экспериментальной интенсивностей рентгеновского излучения. Экспериментальная и теоретическая рентгенограммы (рис. 1) показывают хорошее качество проведённого уточнения. На это указывают так же маленькие значения факторов недостоверности (табл. 1). Координаты и изотропные тепловые параметры атомов структуры приведены в таблице 1.

Кристаллическая структура  $\beta$ -RbSm(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> состоит из связанных между собой через вершины слоев тетраэдров MoO<sub>4</sub> и квадратных антипризм SmO<sub>8</sub> (рис. 2). Атомы рубидия расположены в промежутках между слоями из групп MoO<sub>4</sub> и SmO<sub>8</sub>.

**Таблица 1.** Координаты и изотропные тепловые параметры атомов  $\beta$ -фазы кристалла RbSm(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> при 293 К

Атом	$x/a$	$y/b$	$z/c$	$B_{iso}^*/B_{eq}$
<b>Rb1</b>	0,5	0,2675	0,25	2,7 (3)
<b>Sm1</b>	0	0,0086	0,25	1,0 (3)
<b>Mo1</b>	0,5186 (8)	0,10034 (14)	0,9829 (3)	0,6 (3)
<b>O1</b>	0,736 (3)	0,0972 (15)	0,147 (3)	0,5 (4)
<b>O2</b>	0,742 (3)	0,0864 (12)	0,807 (3)	0,5 (4)
<b>O3</b>	0,249 (4)	0,0373 (11)	-0,014 (4)	0,5 (4)
<b>O4</b>	0,412 (4)	0,1850 (10)	0,978 (2)	0,5 (4)

Пространственная группа – Pbcn, Z = 4. Параметры ячейки: a = 5,142 Å, b = 18,817 Å, c = 8,162 Å. В скобках указаны стандартные отклонения. Профильный фактор недостоверности R<sub>p</sub> = 3,562, брэгговский интегральный фактор недостоверности R<sub>B</sub> = 2,989.



*Рис. 2. Кристаллическая структура  $\beta$ -фазы RbSm(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> при 293 К. Показаны слои тетраэдров MoO<sub>4</sub> (Mo – в центре тетраэдра) и квадратных антипризм SmO<sub>8</sub> (Sm – в центре антипризмы). Атомы Rb расположены в промежутках между слоями*

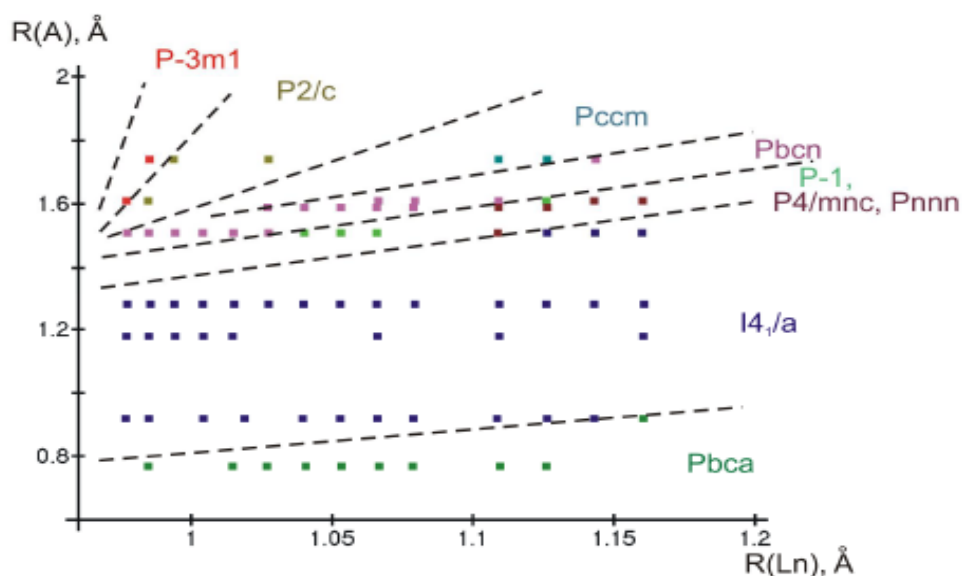
## 2. Ведущий параметр в двойных молибдатах

Для выявления основного параметра, определяющего структурный тип и основные структурные характеристики, рассмотрены 75 представителей двойных молибдатов с общей формулой  $ALn(MoO_4)_2$  ( $A = Li - Cs, Cu, Ag$ ;  $Ln = La - Lu$ ) из Международной базы кристаллографических данных неорганических соединений. Основные представители из этой базы данных приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Структурные характеристики основных представителей из двойных молибдатов  $ALn(MoO_4)_2$ .  $V$  – объём, приходящийся на одну формульную единицу

Соединение	Симметрия	$V, \text{\AA}^3$	$R_A/R_{Ln}$
<b>RbNd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	Pbcn	199,93	2,037
<b>CsNd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	Pccm	199,87	1,569
<b>TlNd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	P4/nnc	188,9	1,434
<b>RbPr(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	Pnnn	186,95	1,430
<b>KEu(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	P-1	174,06	1,417
<b>KPr(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	I4 <sub>1</sub> /a	176,02	1,341
<b>RbSm(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	Pbcn	197,43	1,260
<b>LiEu(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	P-1	153,30	0,863
<b>CuEu(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub></b>	Pbca	184,40	0,722

Из рассмотрения табл. 2 можно сделать вывод, что все множество структур двойных молибдатов условно разбивается на восемь областей, имеющих различные симметрии и параметры кристаллических ячеек. При этом основным параметром, определяющим принадлежность того или иного соединения из ряда  $ALn(MoO_4)_2$  к соответствующей группе по симметрии и параметрам кристаллической ячейки, является отношения  $R_{Ln}/R_A$ . Более наглядно это положение представлено на рис. 3.



**Рис. 3.** Области существования двойных молибдатов  $ALn(MoO_4)_2$ .  $R(A)$  и  $R(Ln)$  – радиусы ионов  $A$  и  $Ln$



Итак, отношение радиусов  $R_{Ln}/R_A$  является ключевым структурным параметром всех этих соединений, а симметрия кристалла лишь незначительно влияет на такой параметр кристаллической ячейки, как её объём. К примеру,  $LiLa(MoO_4)_2$  (Pbca) и  $NaLa(MoO_4)_2$  (I4<sub>1</sub>/a) имеют одинаковые объёмы ячеек, но совершенно разные пространственные группы.

Таким образом, знание отношений радиусов  $R_{Ln}/R_A$  может быть полезно при выборе комбинаций ионов Ln и A, которые будут наиболее перспективными для создания новых двойных молибдатов  $ALn(MoO_4)_2$  с прогнозируемыми симметриями и параметрами кристаллической ячейки.

### **Заключение**

Методом рентгеновской порошковой дифракции определена структура нового соединения  $\beta$ -фазы кристалла  $RbSm(MoO_4)_2$  при 293 К. По данным о структурах двойных молибдатов  $ALn(MoO_4)_2$  (A = Li – Cs, Cu, Ag; Ln = La – Lu) делается вывод, что отношение радиусов  $R_{Ln}/R_A$  является ключевым структурным параметром всех этих соединений, определяющим принадлежность того или иного соединения из ряда  $Ln(MoO_4)_2$  к соответствующей группе по симметрии и параметрам кристаллической ячейки. Таким образом, по отношению  $R_{Ln}/R_A$  можно прогнозировать и синтезировать новые соединения  $ALn(MoO_4)_2$  с заданными симметриями и структурными параметрами.

## **ФИЗИКА**

УДК 530.12:531.51

### **СВЕРХПЛОТНЫЕ ЗВЕЗДЫ И ТЯЖЕЛЫЕ ЛЕПТОНЫ**

**М.А. Атрохова**

**Научный руководитель канд. физ.-мат. наук Н.Н. Паклин**

*Сибирский федеральный университет*

Исследовано статическое сферически симметричное распределение сверхплотного вещества в рамках общей теории относительности. Такие модели используются для описания внутреннего строения релятивистских звезд. Гравитационное поле внутри звезды вычисляется с помощью неоднородных, то есть не вакуумных уравнений Эйнштейна

$$G_{ik} = -8\pi G c^{-4} T_{ik} , \quad (1)$$

где величина  $G_{ik}$  – тензор Эйнштейна – выражается через метрический тензор и его производные, а также описывает геометрию пространства,  $T_{ik}$  – тензор энергии-импульса, описывающий физические свойства вещества.

Релятивистская звезда представляет собой статический шар массой  $M$  и радиусом  $R$ . Снаружи шара вещества нет, то есть вакуум. Вещество внутри шара описывается тензором энергии-импульса идеальной жидкости, без вязкости, теплопроводности и излучения

$$T_{ik} = (\varepsilon + p) u_i u_k - p g_{ik} . \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon$  – плотность энергии,  $p$  – давление и 4-скорость  $u^i = dx^i / ds$ ,  $g_{ik}$  – метрический тензор, соответствующий квадрату интервала

$$ds^2 = y^2 dt^2 - z^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) . \quad (3)$$

В работе используются, геометрическая система единиц. Скорость света  $c$  и постоянная тяготения Ньютона  $G$  приняты равными единице. Размерный коэффициент  $k = \frac{8\pi G}{c^4}$  – гравитационная постоянная Эйнштейна, в геометрической системе единиц равна  $8\pi$ . Латинские индексы пробегает значения  $i, j, k = 0, 1, 2, 3$ . Компоненты 4-мерного радиус-вектора в сферической системе координат определяются как  $x^0 = t$ ,  $x^1 = r$ ,  $x^2 = \theta$ ,  $x^3 = \phi$ , где  $t$  – время,  $r$  – радиальная переменная,  $\theta$  и  $\phi$  угловые переменные. Функции  $\varepsilon$ ,  $p$ ,  $y$ ,  $z$  зависят только от переменной  $r$ .

Выпишем уравнения Эйнштейна в явном виде

$$8\pi\varepsilon = (1 - z)/r^2 - z'/r, \quad (4)$$

$$8\pi p = (z - 1)/r^2 + 2zy'/ry, \quad (5)$$

$$2r^2 zy'' + (rz' - 2z)ry' + [2(1 - z) + rz']y = 0. \quad (6)$$

Чтобы проинтегрировать уравнения (4)–(6), необходимо задать дополнительное условие. Можно задать уравнение состояния, так было сделано в работе [1]. Такой подход требует численного интегрирования и только в исключительных случаях удастся получить аналитическое выражение. В работе [2] был предложен другой подход к моделированию релятивистских звезд. Этот подход основан не на уравнении состояния во всем объеме звезды, а на точном решении уравнений Эйнштейна для статического сферически симметричного распределения идеальной жидкости. После того как аналитическая модель релятивистской звезды построена, исследуются ее физические свойства. Чтобы оценить пригодность такой модели для описания нейтронных звезд, задается уравнение состояния нейтронного газа в центре шара.

Именно такой подход используется в данной работе, но мы обратим внимание на важный вопрос: как изменятся физические свойства модели, если вместо нейтронов использовать газ  $\tau$ -лептонов.

Нейтроны и лептоны являются фермионами. Если высокая плотность внутри шара обеспечивает условие вырождения, то оба сорта частиц можно описывать уравнением состояния для идеального вырожденного ферми-газа

$$\varepsilon_0 = K \cdot [\text{sh}(f) - f], \quad p_0 = \frac{K}{3} \cdot \left[ \text{sh}(f) - 8 \text{sh}\left(\frac{f}{2}\right) + 3f \right], \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0 \equiv \varepsilon(r=0)$ ,  $p_0 \equiv p(r=0)$ ,  $K = \pi m_0^4 c^5 / 4h^3$ , здесь используются обычные обозначения для скорости света и постоянной Планка,  $m_0$  – масса покоя фермиона,  $f = 4 \text{Arsh}(P_f / m_0 c)$ ,  $P_f$  – ферми-импульс.

Таким образом, различие физических свойств моделей будет определяться различными массами нейтронов и  $\tau$ -лептонов. Приведем справочные сведения о массах

$$m_n = 939,573 \text{ МэВ}, \quad m_\tau = 1784,1 \text{ МэВ}, \quad (m_\tau / m_n)^2 = 3,6.$$

В качестве аналитической модели используем простейшее решение уравнений Эйнштейна – внутреннее решение Шварцшильда

$$z = 1 - \kappa \varepsilon_0 r^2 / 3, \quad (8)$$

$$y = \frac{1}{2} \left( 3 \sqrt{1 - \kappa \varepsilon_0 R^2 / 3} - \sqrt{1 - \kappa \varepsilon_0 r^2 / 3} \right), \quad (9)$$

$$p = \varepsilon_0 \left[ \frac{\sqrt{1 - \kappa \varepsilon_0 r^2 / 3} - \sqrt{1 - \kappa \varepsilon_0 R^2 / 3}}{3 \sqrt{1 - \kappa \varepsilon_0 R^2 / 3} - \sqrt{1 - \kappa \varepsilon_0 r^2 / 3}} \right]. \quad (10)$$

Это решение сшито на границе шара  $r = R$  с внешним решением Шварцшильда

$$z = 1 - 2M / r, \quad (11)$$

$$y = \sqrt{1 - 2M / r}. \quad (12)$$

Сшивку позволила выразить внешние астрономически наблюдаемые параметры звезды – массу  $M$  и радиус  $R$ , через внутренние параметры звезды – давление и плотность в центре звезды.

$$R = \frac{2\sqrt{3}\sqrt{k(1+2k)}}{\sqrt{\kappa \varepsilon_0 (1+3k)}}, \quad k = p_0 / \varepsilon_0. \quad (13)$$

$$M = \kappa \varepsilon_0 R^3 \cdot c^2 / 6G. \quad (14)$$

Из выражений (13) и (14) видно, что

$$R \propto \varepsilon_0^{-1/2} \Rightarrow M \propto \varepsilon_0^{-1/2}, \quad \varepsilon_0^{1/2} \propto m_0^2 \Rightarrow M \propto m_0^{-2}. \quad (15)$$

В астрофизике звезд важную роль играет зависимость масса-радиус  $M(R)$ . По виду этой зависимости можно сделать выводы о запасе устойчивости модели. Устойчивым равновесным состоянием отвечает участок кривой с  $dM/dR < 0$ . Максимум кривой указывает на критическое состояние модели.

Давление и плотность в центре звезды являются свободными параметрами, которые следует связать уравнением состояния идеального вырожденного ферми-газа (7), что позволило вычислить критические параметры модели: максимальную массу и соответствующий равновесный радиус, а соотношения (15) помогают изобразить кривые для нейтронных и  $\tau$ -лептонных звезд и сравнить их, рис. 1 и 2.

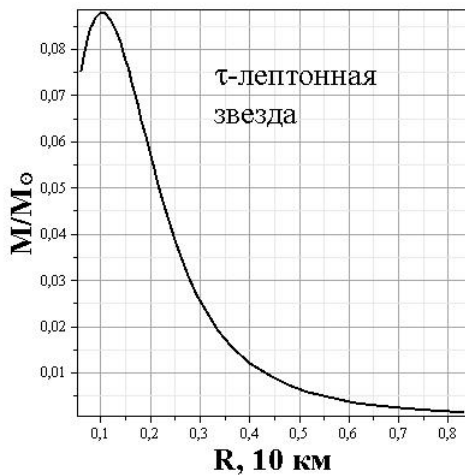


Рис. 1

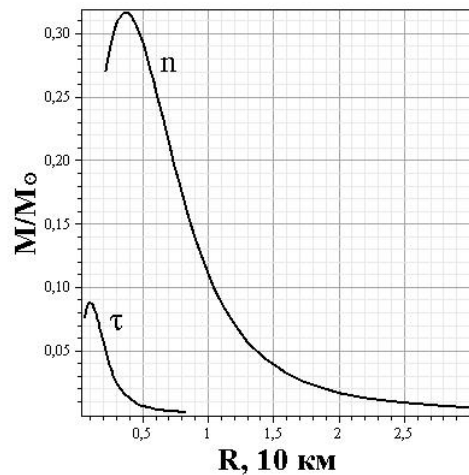


Рис. 2

Вывод: максимальная масса и минимальный радиус  $\tau$ -лептонной звезды почти в 3 раза меньше, чем у нейтронной. Рост гравитации опережает рост давления ферми-газа при увеличении массы фермиона. Частота малых радиальных пульсаций на основной моде для  $\tau$ -лептонной звезды увеличивается 3,6 раза по сравнению с нейтронной звездой.

### Список литературы

1. Oppenheimer J. R., Volkoff G. M. On massive Neutron Cores // Phys. Rev. 1939. V. 55. P. 374. (имеется русский перевод: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979. С. 337–352).
2. Tolman R. C. Static solutions of Einstein's field equations for spheres of fluid // Phys. Rev. 1939. V. 55. P. 364–373.

## КАК СКОНСТРУИРОВАТЬ ПРОСТЕЙШИЙ ПОЛЯРИСКОП

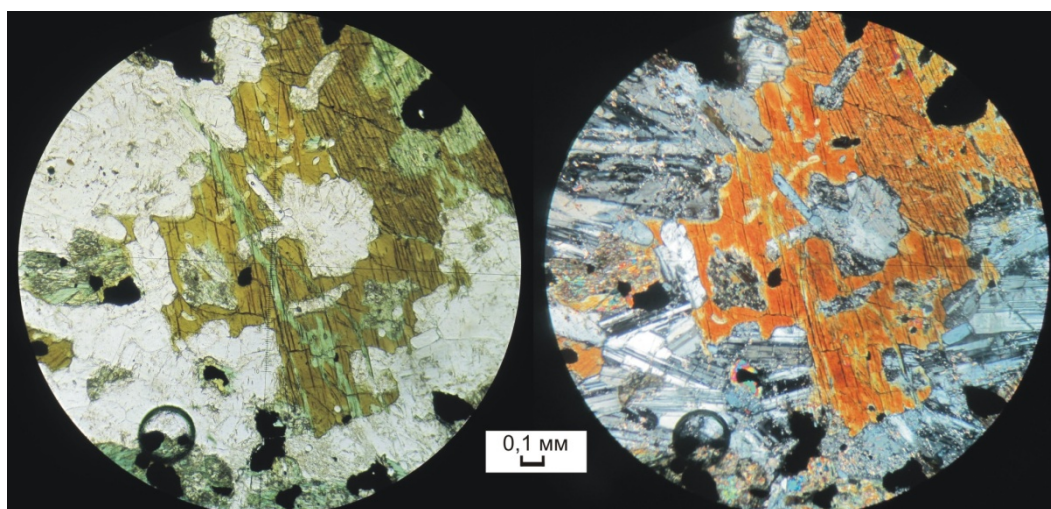
**Б.М. Лобастов**

**Научный руководитель канд. техн. наук А.Е. Машукова**

*Сибирский федеральный университет*

Роль физики сложно переоценить в геологии, которая изучает Землю в планетарном масштабе, а ее минералы – на атомном уровне. В геологических исследованиях применяются физические методы, в частности, самыми доступными является оптические методы.

Кристаллооптика – это пограничная область оптики и кристаллофизики, охватывающая изучение законов распространения света в кристаллах. Характерными для некоторых кристаллов являются: двойное лучепреломление, поляризация света, вращение плоскости поляризации, плеохроизм, показатель преломления. Всё это – диагностические свойства для определения минералов в шлифах (тонких спилах горных пород толщиной 0,03 мм, приклеенных к предметным стёклам и накрытых покровными стёклами), которые устанавливаются при помощи поляризационного микроскопа (рис. 1).



*Рис. 1. Шлиф под микроскопом: слева без анализатора, справа в скрещенных николях*

К сожалению, студенты геологических специальностей на младших курсах часто не осознают необходимости знаний по физике и только при изучении специальных дисциплин оценивают, насколько это важно. Так, в геологии возникает необходимость определять изотропность и анизотропность кристаллов и вставок в различных изделиях и ювелирных украшениях. Для этого пользуются полярископом, но это довольно хрупкий и тяжёлый прибор, и, кроме того, он дорого сто-

ит. Поэтому было решено изготовить для экспресс-анализа анизотропности/изотропности материалов полярископ из подручных средств, простой в исполнении.

Полярископ устроен следующим образом (рис. 2): свет от источника света проходит через два поляризатора, у которых плоскости пропускания световых колебаний скрещены под  $90^\circ$ , исследуемый объект помещается между ними. По закону Малюса, открывшего это явление в 1809 году, интенсивность проходящего света через два скрещенных поляризатора будет равна нулю:  $I \sim \cos^2 \varphi$ , где угол  $\varphi$  – угол между главными плоскостями поляризаторов (главная плоскость поляризатора проходит через луч и направление пропускания колебаний светового вектора  $E$ ).

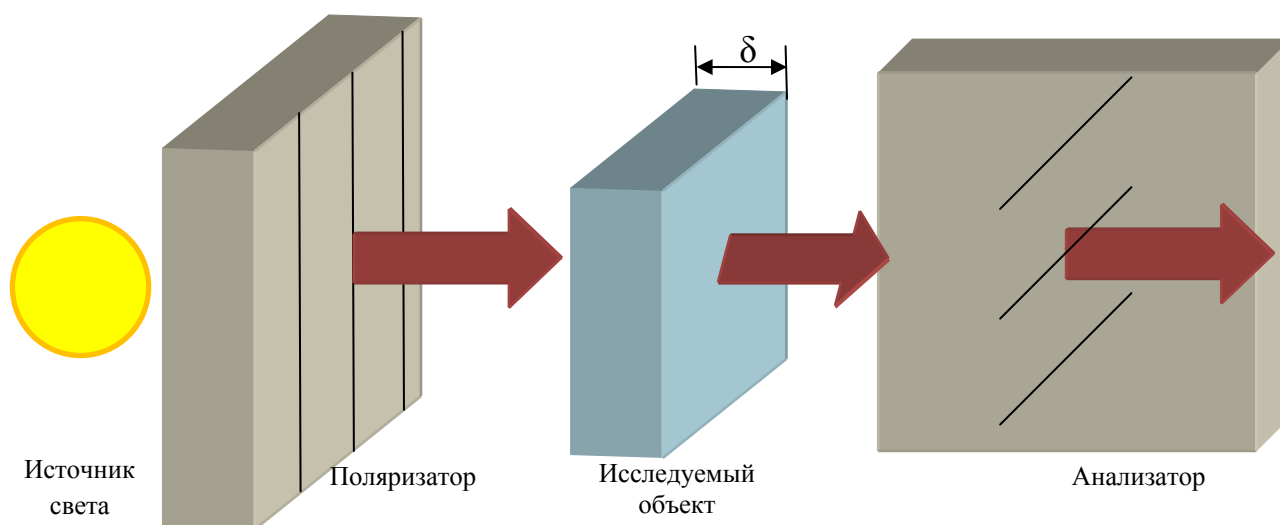


Рис. 2. Устройство полярископа

В качестве анализатора мы использовали только один поляроид. Источником поляризованного света служил жидкокристаллический монитор компьютера. Работать с такой установкой необходимо следующим образом: при выключенном свете необходимо сесть на расстоянии примерно метра от монитора поднести к глазу поляроид, повернуть его, пока экран не «погаснет», и начать рассматривать интересные объекты. Изотропные материалы при любом рассмотрении остаются серыми, в то время как анизотропные материалы переливаются яркими цветами и становятся ярче или темнее при повороте. Эти материалы проявляют различные, в данном случае, оптические свойства в разных направлениях.

Для того, чтобы собрать портативный полярископ, необходим второй поляризатор. Можно ли собрать из подручных средств качественные поляроиды? Известен довольно простой метод получения поляризованных лучей, основанный на законе Брюстера – отраженный от диэлектрика свет полностью поляризован, если свет падает под углом Брюстера:  $\text{tg } \alpha_B = n_2 / n_1$ . Если луч падает из воздуха, показатель преломления  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = n$  – абсолютный показатель преломления диэлектри-

ка. При падении луча под углом Брюстера угол между отражённым и преломлённым лучами составляет  $90^\circ$ .

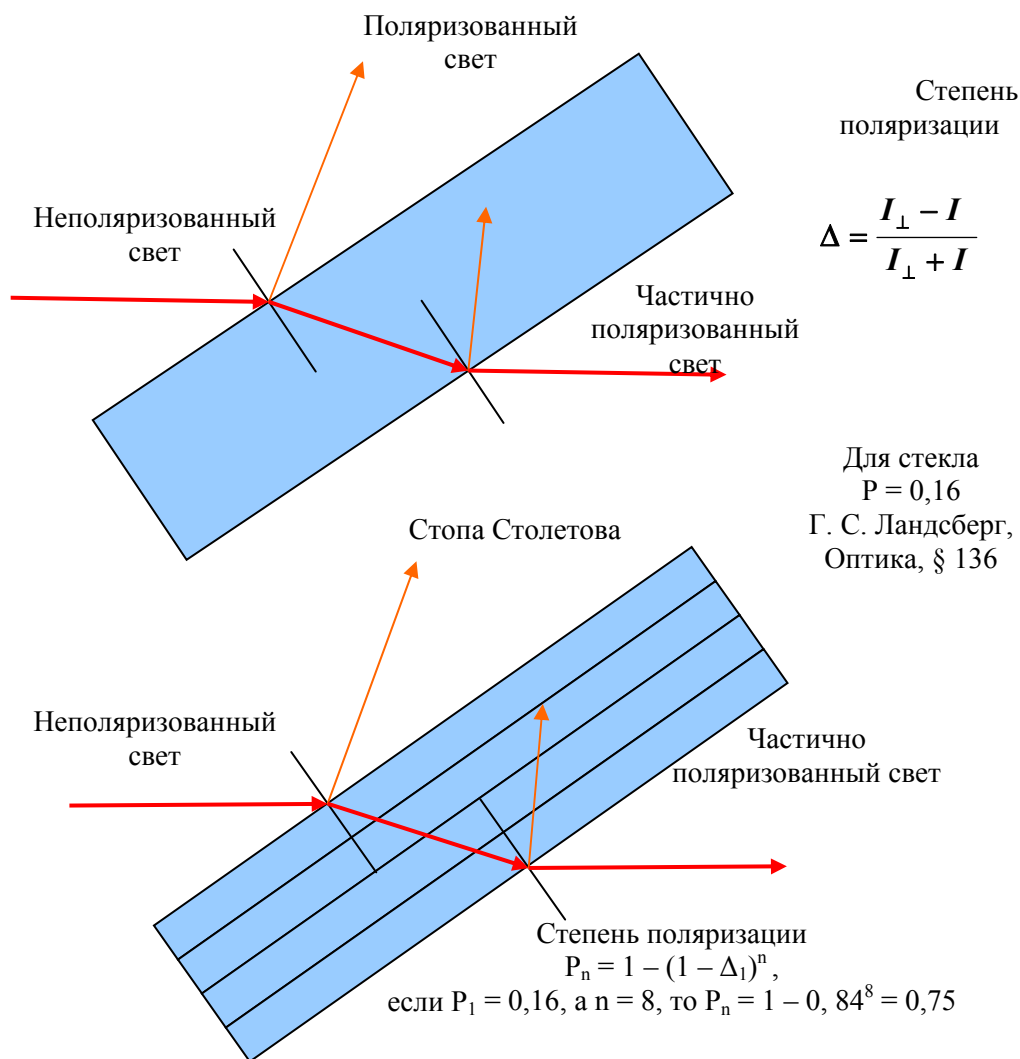
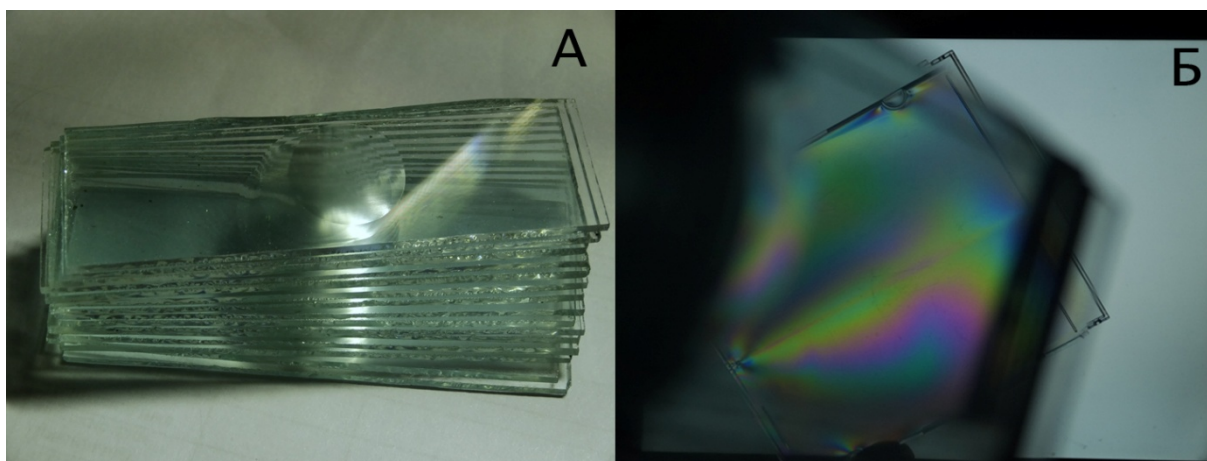


Рис. 3. Стопа Столетова

Таким образом, используя несколько прозрачных пластин из одного материала и зная угол Брюстера для этого материала, мы можем получить поляроиды. Самым распространённым в быту прозрачным пластинчатым материалом является стекло. Для стекла угол Брюстера равен  $56^\circ$ . Как известно из курса физики, установка для поляризации света, состоящая из нескольких пластин, повернутых под определённым углом, называется стопой Столетова. При помощи стопы Столетова естественный свет можно разделить на два луча: в отраженном луче будут преобладать колебания светового вектора  $E$ , перпендикулярные плоскости падения луча, а в преломленном – параллельные ей. Для изготовления стопы мы взяли 8 чистых предметных стёкол, плотно их соединили и повернули к ЖК-монитору, выполнявшему роль поляризатора, примерно под углом падения в  $56^\circ$ . При повороте стопы, выполнявшей роль анализатора, монитор не гас. Сначала это было

непонятно, но по расчетам (комментарии к рис. 3) стало очевидным, что даже 8 стёкол поляризуют свет только частично. Однако при рассмотрении пластиковой пластины через такой анализатор радужная окраска не только была видна, но и менялась при его повороте. Опыт был повторен с другим количеством пластин. Очень слабая поляризация наблюдалась даже при использовании одного стёкла, а с 15-ю стёклами даже стало заметно погасание монитора. Если использовать не предметные плоские стекла, а стёкла с углублениями в середине, что значительно уменьшает полезную площадь при наблюдении, то этот эффект тоже наблюдается.



*Рис. 3. Стопа Столетова из предметных стёкол (а) и её поляризующие свойства (б)*

Однако полярископ, собранный с такими поляризаторами, получался очень неудобным, так как стёкла не были достаточно закреплены, могли сбиться с нужного угла или даже выпасть. Поэтому было решено вернуться к жидкокристаллическим дисплеям. Взяв два дисплея из старых, отслуживших свой срок приборов или игрушек, и установив, в каком положении они совсем не пропускают свет, необходимо было придумать, в чём их закрепить. Для этого идеально подошёл пластиковый стакан объёмом в 0,5 литра с двумя прорезями: в виде окошка для помещения образца в центре и прорезью в дне для второго поляризатора.

Таким образом сконструированный прибор позволяет определять изотропность/анизотропность кристаллов, отличать в ювелирных изделиях кристаллы от стёкол, наблюдать напряжения в пластике и стёклах, то есть наблюдать искусственную анизотропию, возникающую под действием механических напряжений. В текущий момент разрабатывается прототип с корпусом из термопластика поликапролактона ( $[-(\text{CH}_2)_5\text{CO}_2\text{O}-]_n$ ), что позволит сделать прибор выглядящим достойно, а главное, удобным в использовании.



## ДИНАМИКА РЕЛЯТИВИСТСКОЙ СФЕРЫ С ОДНОРОДНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

С.И. Полукеев

Научный руководитель канд. физ.-мат. наук Н.Н. Паклин

*Сибирский федеральный университет*

Исследуется гравитационное поле нестационарного сферически симметричного распределения материи. Поле определяет геометрию пространства-времени и описывается метрическим тензором  $g_{ik}$ . Свойства вещества описываются тензором энергии-импульса  $T_{ik}$ . Связь поля с материей определяется уравнениями Эйнштейна

$$G_{ik} = -8\pi G c^{-4} T_{ik} , \quad (1)$$

где величина  $G_{ik}$  – тензор Эйнштейна – выражается через метрический тензор и его производные. Вещество описывается простой моделью с тензором энергии-импульса идеальной жидкости

$$T_{ik} = (\varepsilon + p) u_i u_k - p g_{ik} , \quad (2)$$

здесь  $\varepsilon(t, r)$  – плотность энергии,  $p(t)$  – давление и  $u^i = dx^i / ds$  – скорость.

В работе используются сферические координаты, сопутствующая система отсчета (радиальная скорость вещества  $v = dr / dt$  обращается в ноль) и геометрическая система единиц:  $G = c = 1$ . Выражение

$$T^{ik}{}_{;k} = 0 \quad (3)$$

является следствием уравнений Эйнштейна, для случая  $p = p(t)$  из него следует, что  $g_{00} = g_{00}(t)$ . Введем синхронно-сопутствующую систему отсчета с метрикой

$$ds^2 = dt^2 - F^2 dr^2 - R^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) , \quad (4)$$

где  $F = F(t, r)$ ,  $R = R(t, r)$ . При сферической симметрии система уравнений Эйнштейна состоит из четырех уравнений, но только три из них являются независимыми. Уравнение  $G_{01} = -8\pi T_{01}$  легко интегрируется, а результат удобно представить как

$$F = R' / \sqrt{1 - q(r)} , \quad (5)$$

где  $q(r)$  – произвольная функция. Теперь  $G_{00} = -8\pi T_{00}$  и  $G_{11} = -8\pi T_{11}$  имеют вид

$$8\pi\varepsilon(t,r) \cdot R^2 R' = [R(q(r) + \dot{R}^2)]' , \quad 8\pi p(t) \cdot R^2 + q(r) + \dot{R}^2 + 2R\ddot{R} = 0 . \quad (6)$$

Анализ уравнений (6) показывает, что при  $p > 0$  коллапс является конечным результатом эволюции модели. Если  $q(r) \geq 0$ , то модель ведет себя подобно пылевому шару в вакууме с «замкнутой» геометрией. В случае  $q(r) < 0$  поведение модели существенно зависит от начальных условий и вида функции  $p(t)$ .

Обнаружен осциллирующий режим с возрастающей амплитудой, когда амплитуда становится сравнимой с начальным значением  $R$ , шар коллапсирует.

Если давление можно считать постоянным, то уравнения (6) интегрируются как

$$R\dot{R}^2 = a(r) - q(r) \cdot R - \frac{1}{3}8\pi p \cdot R^3 ; \quad 8\pi\varepsilon(t,r) = a' / R^2 R' - 8\pi p , \quad (7)$$

где  $a(r)$  – произвольная функция.

Колебания возможны, если скорость равна нулю при двух значениях  $R$ , т. е. если правая часть первого уравнения (7) имеет два действительных положительных корня. Неравенство  $8\pi p \cdot 9a^2 < -4q^3$  является условием колебаний. Поскольку в нем присутствуют функции  $a(r)$  и  $q(r)$ , то условия колебания могут нарушаться для некоторых слоев шара, в результате они будут монотонно сжиматься.

Общее решение первого уравнения (7) представим в виде квадратуры

$$\int \frac{dz}{\sqrt{1 - z^2 - q \cdot \beta \cdot z^{2/3}}} = \sqrt{6\pi p} \cdot t + b(r) ; \quad z^2 = \frac{8\pi p}{3a} \cdot R^3 ; \quad \beta = \left( \frac{3}{8\pi p a^2} \right)^{1/3} . \quad (8)$$

В случае  $q = 0$  возможно точное решение

$$R = (3a/8\pi p)^{1/3} \sin^{2/3} \left( \sqrt{6\pi p} \cdot t + b(r) \right) , \quad (9)$$

здесь  $b(r)$  – произвольная функция.

Если знак давления сохраняется, а само давление мало меняется по абсолютной величине или меняется медленно, то поведение модели будет подобно эволюции в случае постоянного давления. Такой случай удобно анализировать качественно с помощью фазовых портретов. Первое из уравнений (6) удобно переписать в виде

$$\begin{cases} \dot{R} = V, \\ \dot{V} = -(V^2 + q) / 2R - 4\pi p(t)R. \end{cases} \quad (10)$$

В случае постоянного давления система (10) становится автономной, для этого случая обнаружено четыре варианта фазовых портретов:

1) Монотонное поведение:  $p > 0$ ,  $q > 0$ , величина  $R$  может обращаться в ноль (рис. 1).

2) Катастрофическое поведение:  $p > 0$ ,  $q < 0$ , величина  $R$  может обращаться в ноль либо колебаться (имеется особенность типа «центр») (рис. 2).

3) Катастрофическое поведение:  $p > 0$ ,  $q < 0$ , величина  $R \rightarrow 0$  асимптотически либо  $R \rightarrow \infty$  (рис. 3).

4) Катастрофическое поведение:  $p > 0$ ,  $q > 0$ , величина  $R$  может обращаться в ноль либо  $R \rightarrow \infty$  (имеется особенность типа «седло») (рис. 4).

Данная модель может отражать некоторые свойства реальных тел, например, явление отскока при коллапсе. Некоторые решения можно интерпретировать как пылевой шар (темная материя), погруженный в однородную жидкость (темная энергия), т. е. эволюцию крупномасштабной неоднородности на однородном космологическом фоне.

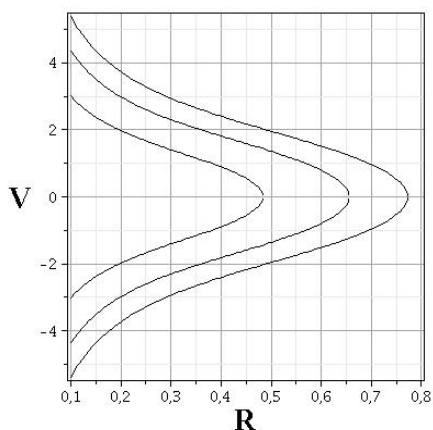


Рис. 1

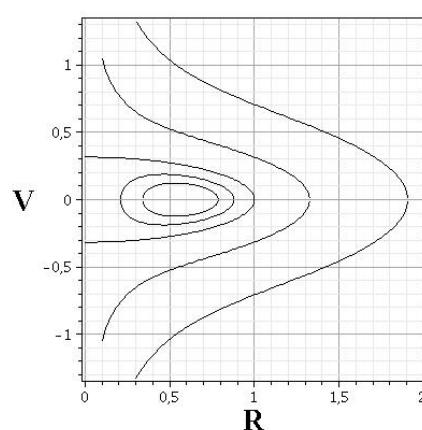


Рис. 2

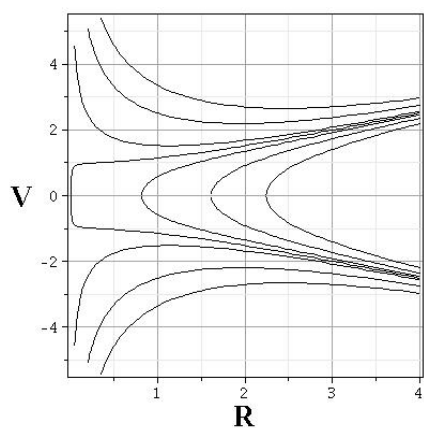


Рис. 3

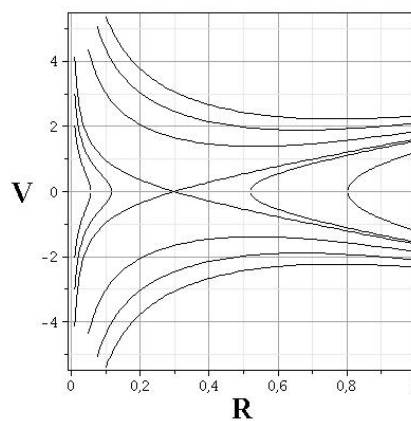


Рис. 4

Для рис. 1 выбраны следующие значения параметров:  $8\pi\rho = 15$ ,  $q = 0,9$ ;

Для рис. 2 параметры:  $8\pi\rho = 0,3$ ,  $q = -0,1$ ;

Для рис. 3 параметры:  $8\pi\rho = -1$ ,  $q = -1$ ;

Для рис. 4 параметры:  $8\pi\rho = -10$ ,  $q = 0,9$ .

УДК 621.74(07)

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОМАРГАНЦЕВЫХ СПЛАВОВ

**А.А. Фитисенко, М.А. Воронина**

**Научный руководитель канд. техн. наук И.В. Дубова,  
канд. техн. наук Г.С. Саначева**

*Сибирский федеральный университет*

В 2008 году на Красноярском экономическом форуме был подписан договор о строительстве в Красноярске ферросплавного завода. Для строительства ферросплавного завода в Красноярске «ЧЕК-СУ.ВК» приобрел часть промышленных корпусов на территории бывшего завода «Крастяжмаш». Тогда эта новость прошла незамеченной, однако, спустя три года, когда строительство было уже не за горами, общественность начала сбор подписей против завода. Отрицательное отношение жителей Красноярска к строительству ферросплавного завода приняло характер эпидемии.

В нашей проектной работе мы рассмотрели экологические аспекты производства ферромарганцевых сплавов. Актуальностью данной статьи является существующее противоречие между высокой потребностью российской промышленности в собственном производстве ферросплавов и негативным влиянием отходов производства этих сплавов на окружающую среду.

Цель проекта – анализ экологии предприятия ферросплавного производства. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: изучение литературы по ферромарганцевому производству; выявление экологических факторов производства; анализ мнений общественности о строительстве завода в Красноярске. В работе использованы теоретические и аналитические методы решения.

Годовое потребление марганцевых ферросплавов металлургическими предприятиями России оценивается в 650 тыс. тонн. Потребность черной металлургии в марганцевых сплавах возрастет к 2020 г. примерно на 30 % (рисунок).

Объем мировых запасов марганцевых руд по оценкам USGS на начало 2011 г. составил 647 млн тонн. Доля России в мировом производстве ферромарганца за период 2001–2005 гг. выросла почти в 2 раза – с 1,4 % в 2001 г. до 2,3 % в 2005 г.

До последнего времени Россия удовлетворяла потребности ферромарганца с помощью поставок с Украины, Казахстана и Грузии. Но такое большое, индустриально развитое государство, как Россия, должно развивать собственное производство данных немаловажных сплавов.

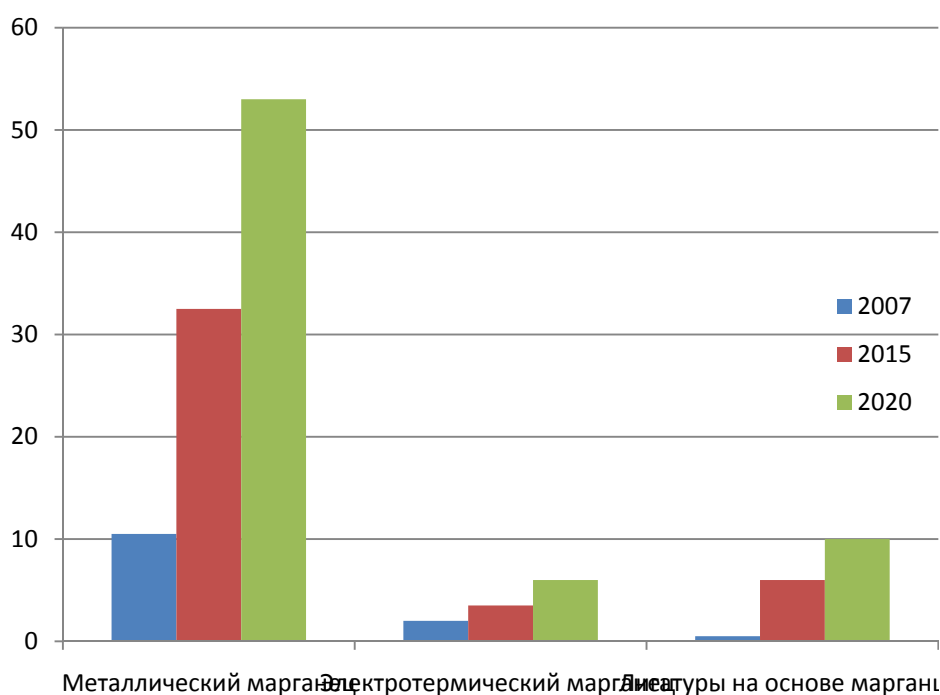


Рис. 1. Потребность черной металлургии в марганцевых сплавах, тыс. тонн

Первые попытки собственной добычи были в 2005 г. В 2006 г. российское производство ферромарганца, по данным INFOGEO, выросло относительно 2005 г. до 140,3 тыс. тонн. В 1-м полугодии 2007 г. производство ферромарганца в России составило 74,3 тыс. тонн.

Ферросплавы, содержащие марганец, в России производят из импортного сырья, в основном это Челябинский электрометаллургический комбинат, Алапаевская ферросплавная компания, Ключевской ферросплавный завод, Саткинский чугуноплавильный завод, Косогорский металлургический завод.

#### Что такое ферромарганец? Где его используют?

Ферромарганец – это сплав, основным компонентом которого являются марганец и железо. Наибольшее применение в производстве получили ферромарганец ФМн 78 и ФМн 88 – эти марки обладают лучшими потребительскими свойствами.

Таблица 1. Состав ферромарганцевых сплавов марок ФМн78 и ФМн88

Марка ферромарганца	Содержание, %					
	Mn	C	Si	P	S	Fe
ФМн78	75-82	7,0	6,0	0,75	0,02	11
ФМн88	85-95	2,0	3,0	0,5	0,02	9

Ферромарганец 78 и 88 широко используют для легирования стали, сплавов и чугуна в литейном производстве, а также для обмазки сварочных электродов. В сталеплавильной индустрии его применяют в качестве раскислителя при произ-

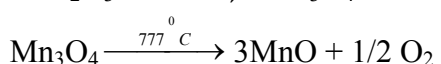
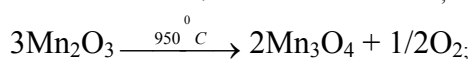
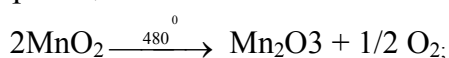
водстве почти всех марок сталей и как легирующий элемент при выплавке низколегированных и специальных сталей. Производятся все виды марганца флюсовым и бесфлюсовым способами.

Продукты ферросплавных заводов являются частью сырьевой базы черной металлургии, без этих продуктов не может обходиться литейное производство (ведь нет отливок – нет машиностроения).

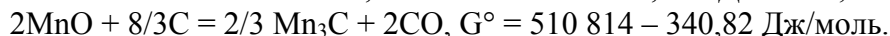
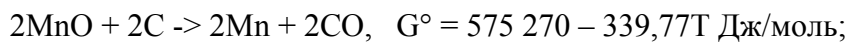
#### *Как получают ферромарганец?*

Исходными материалами при производстве ферромарганца являются марганцевые руды, коксик и стальная стружка. Восстановителем является углерод.

Рассмотрим химизм процесса получения ферромарганцевых сплавов. При плавке ферромарганца в процессах восстановления наибольшую роль играет оксид марганца MnO:

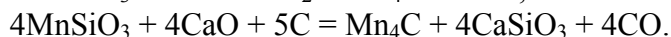
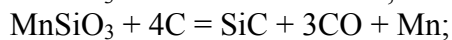
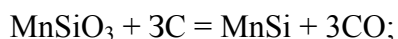


Прямое восстановление высших оксидов марганца углеродом протекает очень успешно, начиная с температур 250–300 °С и завершается в области температур 600–800 °С. Восстановление оксида марганца (II) осуществляется по реакциям:



Восстановительные условия процесса и малая растворимость сульфида марганца (MnS) в сплаве способствуют удалению серы, и ее содержание в ферромарганце обычно не превышает 0,04 %.

Восстановление кремния затруднено, во-первых, тем, что весь кремнезем шлака связан в силикат марганца и, во-вторых, низкими температурами в горне печи при выплавке углеродистого ферромарганца. В печи могут, например, протекать следующие реакции:



Для них температура начала взаимодействия соответственно составляет 1295, 1430, 1395 и 724 °С. Введение в систему извести облегчает восстановление марганца, одновременно связывая кремнезем и затормаживая его восстановление.

Бесфлюсовый углеродистый ферромарганец производят непрерывным процессом, загружая шихту по мере ее проплавления. Отношение P/Mn в руде должно быть менее 0,00375, а при плавке ферромарганца с пониженным содержанием

фосфора – даже менее 0,00335. Температура плавления сплава составляет примерно 1260 °С, шлака – 1300–1400 °С.

Шлак и сплав выпускают одновременно 5–6 раз в смену. Разливку ферромарганца проводят в изложницы или на разливочной машине конвейерного типа. Для полного отделения шлака от металла используют промежуточную изложницу с сифоном. Шлаки подвергают дроблению и используют в качестве сырья при производства силикомарганца. Колошниковый газ закрытых печей при производстве углеродистого ферромарганца содержит примерно 56 % CO, 26 % CO<sub>2</sub> и 2 % O<sub>2</sub>.

*Какие отходы и в каком количестве сопутствуют процессу получения ферромарганца?*

Согласно проектной документация Енисейского ферросплавного завода, для первой очереди будущего завода суммарное количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух составит 3753,1 тонны в год, в их числе 12 твердых веществ общей массой 257,9 тонны и 25 жидких/газообразных общей массой 3495,2 тонны.

Вещества, преобладающие в выбросах – диоксид серы SO<sub>2</sub>, т/г.: 2546,6, оксид углерода CO (601,7), диоксид азота NO<sub>2</sub> (317,4), соединения марганца Mn, MnO, MnO<sub>2</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (151,8 т в год), оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10,3 т в год).

Наибольшее количество пылегазовых выделений приходится на углеродотермические процессы. Образующиеся колошниковые газы содержат 70–90 % оксида углерода и большое количество мелкодисперсной пыли. Так, при производстве 1 т силикомарганца или ферромарганца выход газа составляет 900–1000 м<sup>3</sup> с содержанием в нем пыли 20–30 г/м<sup>3</sup>, 30–35 % которой приходится на MnO.

*Какова вредность выбросов?*

Ферросплавный завод входит в список ста наиболее опасных производств.

Марганец – это тяжёлый металл, он практически не выводится из организма, – относится к числу нейротропных ядов. Вызывает тяжелые нарушения психики, включая галлюцинации – «марганцевое безумие»; развивается марганцевый паркинсонизм (болезнь Паркинсона). Мыслительный процесс заторможен. Избыток марганца в организме ведет к накоплению его в костях и появлению в них изменений, аналогичных симптомам рахита (марганцевый рахит).

**Таблица 2.** Характеристика опасности выбросов ферромарганцевого производства

Вещество	Класс опасности	Действие на организм
Оксиды углерода CO, CO <sub>2</sub>	4	Вытесняет кислород из оксигемоглобина крови, что препятствует переносу кислорода из лёгких к тканям; вызывает удушье, оказывает токсическое действие на клетки, нарушая тканевое дыхание, и уменьшает потребление тканями кислорода
Оксид азота, NO <sub>2</sub>	2	Оказывают раздражающее действие на дыхательные пути и кровяные сосуды
Оксид серы, SO <sub>2</sub>	1	Ядовит

Марганец, Mn	1	Нейротропный яд, вызывает тяжёлые нарушения психики, «марганцевое безумие»
Оксиды марганца MnO, MnO <sub>2</sub> , Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1–2	Нарушение функций ЦНС
Оксид железа, FeO	3	Развитие раковых заболеваний, сахарного диабета, приводит к порокам сердца
Бензопирен, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	4	Канцерогенное вещество, вызывающее генные мутации и раковые заболевания. Образуется при неполном сгорании топлива. Бензопирен обладает высокой химической стойкостью и хорошо растворяется в воде, из сточных вод распространяется на большие расстояния от источников загрязнений и накапливается в донных отложениях, планктоне, водорослях и водных организмах

Безусловно, вредные выбросы от завода ферросплавов неизбежны но, для сравнения, выбросы автотранспорта города Красноярск в год составляют около 300 тысяч тонн в год, и эта цифра продолжает расти с притоком новых автомобилей в город. Разница 4 тысяч и 300 – очевидна.

*Как утилизируют отходы производства ферросплавов?*

При производстве ферромарганцевых сплавов образуются регенерируемые и нерегенерируемые.

Отходы производства – пыль сухой газоочистки, совместно с окисным концентратом фракции 0–4 мм (31,39 тыс. т) поступает на брикет-пресс, мелкофракционный карбонатный концентрат фракции 0–4 мм (55,3 тыс. т) агломерируется на установке периодического действия; получаемые шлаки от производства силикомарганца отправляются на участок переработки шлака, где дробятся до требуемой фракции и отгружаются потребителю как стройматериал (щебень).

С целью снижения выбросов электропечей в атмосферу предусматриваются следующие мероприятия: технологические выбросы газов от электропечей очищают на газоочистках с применением рукавных фильтров с импульсной регенерацией (очистка 94–99 %); технологические выбросы от разливки металла проходят через циклоны, в которых осаждаются до 95 % пыли и отсасывается в дымовую трубу.

Для соблюдения природоохранных требований и уменьшения негативного влияния на водные объекты предусматривается комплекс водоохранных мероприятий: проведение профилактических мероприятий (поддержание территории предприятия в удовлетворительном состоянии, повышение технического уровня эксплуатации железнодорожного и автомобильного транспорта, запрещение мойки автотранспорта на необорудованных площадках и т. д.); систематическое ведение в соответствии с согласованным графиком контроля качества сточных вод аккредитованной лабораторией, имеющей лицензию на данный вид деятельности; систематическое ведение контроля за количеством сбрасываемых сточных вод.

Отходы производства ферросплавов утилизируются: образующиеся при дроблении и расसेве шихтовых материалов (фракции менее 4 мм) используются для собственных нужд при агломерации концентратов; образующиеся при разливке ферросплавов



(скраб) при чистке желобов, печей и ковшей (шлаковые корки с повышенным содержанием металла) возвращаются в переплав. Предварительно их подготавливают в отделении шихтовых материалов; марганцесодержащая пыль сухих газоочисток от электропечей и вентиляционных систем возвращается в производство с предварительным брикетированием с мелкофракционными марганцевыми концентратами.

Анализ мнений общественности по поводу строительства ферросплавного завода, приведенных в открытых источниках, показал, что подавляющее большинство респондентов против строительства завода. Но стоит отметить, мнения в большей степени выражают эмоции, не поддержанные четкими аргументами, основанными на химизме технологических процессов и возможности утилизации отходов.

В заключении можно сказать, что нельзя не считаться с тем, что в тенденциях развития литейного производства России предусматривается увеличение доли сплавов черной металлургии. Эти сплавы по-прежнему доминируют в балансе потребления конструкционных материалов, применяемых в машиностроении. В тоже время, учитывая технологические особенности получения ферромарганцевых сплавов, завод по их производству не может рассматриваться как автономная система, поскольку он взаимодействует с окружающей средой, и его выбросы оказывают заметное влияние на нее. Вредное влияние на окружающую среду должно удерживаться на как можно более низком уровне. Токсичные и агрессивные выбросы должны нейтрализоваться на территории завода, либо необходимо предусмотреть их безопасный сбор и транспортировку к предприятиям, утилизирующим отходы. Мы все должны помнить о том, что обязанность современной промышленности – забота о сохранности окружающей среды в интересах будущих поколений.

УДК 669.714.7

## **ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДОВ СВИНЦА В РЕАКЦИЯХ С АЛЮМИНИЕВЫМ АНОДОМ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ**

**С.С. Лепин**

**Научный руководитель канд. хим. наук Г.А. Королева**

*Сибирский федеральный университет*

Благодаря высокой удельной емкости, отрицательному значению электродного потенциала, невысокой цене и доступности алюминий представляет собой большой интерес для разработчиков гальванических элементов (ГЭ). В настоящее время ГЭ являются наиболее перспективным электрохимическим способом преобразования химической энергии окислительно-восстановительной реакции в электрическую. Промышленность в основном выпускает гальванические элементы с использованием цинковых анодов и ка-

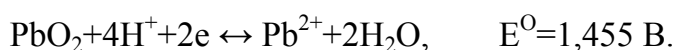
тодов из оксидов марганца, меди, ртути, серебра и свинца. Промышленных гальванических элементов с алюминиевым анодом нет, что связано со склонностью алюминия к коррозии и пассивации. В настоящее время во многих странах ведутся исследования по поиску оптимальных окислителей и способов замедления коррозии алюминия и пассивации. Актуальным остается вопрос о поиске материалов для изготовления катода.

В данной работе проводится оценка окислительной способности оксидов свинца –  $\text{PbO}_2$  и  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  в реакциях с алюминием в различных системах. Компоненты систем подбирались таким образом, чтобы окислительная способность рассматриваемых оксидов возрастала. Для выбора наиболее приемлимых систем необходимо рассчитать значения стандартных потенциалов изучаемых окислительно-восстановительных пар с учетом влияния химических взаимодействий и измерить их величины в условиях, отличных от стандартных.

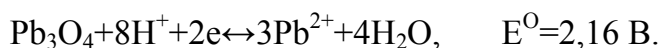
Для решения поставленных задач нами использован метод расчета химических равновесий в реальных условиях и потенциометрический анализ.

Рассмотрим взаимодействие алюминия с соединениями свинца (IV).

Как известно, диоксид Pb проявляет высокую окислительную активность, поэтому разработчики гальванических элементов широко применяют его в качестве окислителя. Окислительные свойства  $\text{PbO}_2$  в кислотной среде:

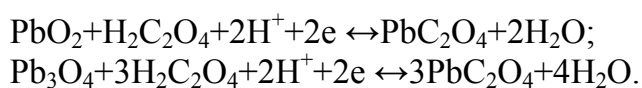


Еще большую окислительную активность проявляет сурик ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ):



Потенциалы этих окислителей в кислой среде можно повысить, если восстановленную форму ( $\text{Pb}^{2+}$ ) связать в устойчивый комплекс или малорастворимое соединение.

Рассмотрим поведение  $\text{PbO}_2$  и  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  в слобокислотной среде, содержащей щавелевую кислоту. Полуреакции восстановления этих соединений имеют вид:



Стандартные потенциалы этих полуреакций рассчитаем по формуле:

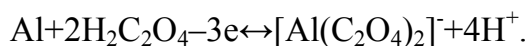
$$\begin{aligned} E^0_{\text{PbO}_2, \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4, \text{H}^+/\text{PbC}_2\text{O}_4} &= E^0_{\text{PbO}_2} - 0,059/2 \cdot \lg \text{PP}(\text{PbC}_2\text{O}_4) + 0,059 \lg K_{\text{об}}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = \\ &= 1,445 - 0,059/2 \lg 4,8 \cdot 10^{-10} + 0,059 \lg 3,02 \cdot 10^{-6} = 1,41 \text{ В.} \\ E^0_{\text{Pb}_3\text{O}_4, \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4, \text{H}^+/\text{PbC}_2\text{O}_4} &= E^0_{\text{Pb}_3\text{O}_4, \text{H}^+/\text{Pb}^{2+}} - 0,059 \cdot 3/2 \cdot \lg \text{PP}(\text{PbC}_2\text{O}_4) + \\ &+ 0,059 \cdot 4/2 \cdot \lg K_{\text{об}}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = 2,41 \text{ В.} \end{aligned}$$

Таким образом, окислительная способность оксидов  $\text{PbO}_2$  и  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  в присутствии щавелевой кислоты возрастает.

Рассмотрим поведение алюминия в этих же условиях. Катионы алюминия с оксалат-ионами образуют устойчивые комплексные ионы:

$\text{Al}^{3+} + 2\text{C}_2\text{O}_4^{2-} \leftrightarrow [\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^-$ ,  $\beta_2 = 1 \cdot 10^{13}$   $\beta_2$  – константа образования комплекса.

Следовательно, процесс окисления алюминия щавелевой кислотой можно представить следующей полуреакцией:



Стандартное значение потенциала этой полуреакции вычисляем по формуле:  $E_{[\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^-/\text{Al}, \text{H}^+/\text{Al}, \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4}^0 = E_{\text{Al}^{3+}/\text{Al}}^0 - 0,059/3 \cdot \lg \beta_2 - 0,059 \cdot 2/3 \cdot \lg K_{06}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = -1,70 \text{ В}.$

Расчеты показывают, что потенциал полуреакции окисления алюминия в присутствии оксалат-ионов смещается в отрицательную область. Определим стандартные значения ЭДС реакций взаимодействия алюминия с  $\text{PbO}_2$  и  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  в присутствии щавелевой кислоты:

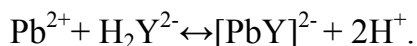


$$\Delta E^0 = 1,46 + 1,70 = 3,16 \text{ В};$$

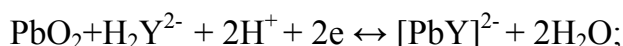


$$\Delta E^0 = 2,41 + 1,70 = 4,11 \text{ В}.$$

Далее нами было решено исследовать поведение соединений свинца (IV) в слабокислотной среде, содержащей ЭДТА – динатриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты  $\rightarrow \text{Na}_2\text{H}_2\text{Y}$ . В этих условиях возможно образование комплексоната свинца (II):



Восстановление соединений  $\text{Pb(IV)}$  можно записать в виде следующих полуреакций:

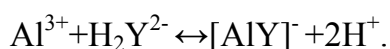


$$E_{\text{PbO}_2, \text{H}_2\text{Y}^{2-}, \text{H}^+ / [\text{PbY}]^{2-}}^0 = E_{\text{PbO}_2, \text{H}^+ / \text{Pb}^{2+}}^0 + 0,059/2 \cdot \lg \beta_{\text{PbY}} + 0,059/2 \cdot \lg K_3 \cdot K_4(\text{H}_4\text{Y}) = 1,50 \text{ В};$$

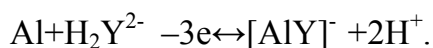
$$\text{Pb}_3\text{O}_4 + 3\text{H}_2\text{Y}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2e \leftrightarrow 3[\text{PbY}]^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}; E_{\text{Pb}_3\text{O}_4, \text{H}_2\text{Y}^{2-}, \text{H}^+ / [\text{PbY}]^{2-}}^0 = E_{\text{Pb}_3\text{O}_4, \text{H}^+ / \text{Pb}^{2+}}^0 + 0,059 \cdot 3/2 \cdot \lg \beta_{\text{PbY}} + 0,059 \cdot 3/2 \cdot \lg K_3 \cdot K_4(\text{H}_4\text{Y}) = 2,34 \text{ В}.$$

Следовательно, образование комплексоната свинца приводит к смещению окислительных потенциалов  $\text{PbO}_2$  и  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  в положительную область.

Окисленная форма окислительно-восстановительной пары  $\text{Al}^{3+}/\text{Al}$  ( $E^0 = -1,66 \text{ В}$ ) связывается ЭДТА в устойчивый комплексонат алюминия:



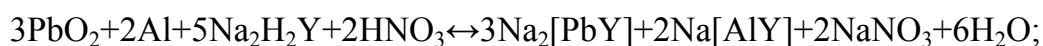
Полуреакция окисления алюминия в присутствии ЭДТА имеет вид:



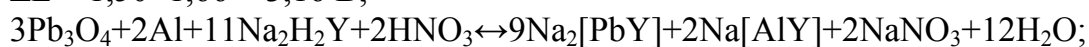
Стандартное значение потенциала этой полуреакции рассчитаем по формуле:

$$E_{[\text{AlY}]^-/\text{Al}, \text{H}_2\text{Y}^{2-}}^0 = E_{\text{Al}^{3+}/\text{Al}}^0 - 0,059/3 \cdot \lg \beta_{\text{AlY}} - 0,059/3 \cdot \lg K_3 K_4 (\text{H}_4\text{Y}) = -1,66 - 0,32 + 0,32 = -1,66 \text{ В.}$$

Стандартные значения ЭДС реакций взаимодействия алюминия с  $\text{PbO}_2$  и  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  в присутствии ЭДТА составляют:



$$\Delta E^0 = 1,50 + 1,66 = 3,16 \text{ В};$$



$$\Delta E^0 = 2,34 + 1,66 = 4,0 \text{ В.}$$

Таким образом, полученные значения ЭДС свидетельствуют, что оксид  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  является более перспективным окислителем алюминия в присутствии щавелевой кислоты или ЭДТА по сравнению с  $\text{PbO}_2$ .

Измерение потенциалов изучаемых окислительно-восстановительных пар проводили *потенциометрическим методом*.

Стандартные потенциалы пригодны для расчетов равновесий в системах, когда можно пренебречь электрическими взаимодействиями и конкурирующими химическими реакциями с участием окисленной или восстановленной форм. Для уменьшения ошибок расчетов в реальных условиях можно воспользоваться формальными потенциалами. Формальным называют потенциал полуреакции при условии, что концентрации окисленной и восстановленной форм равны одному моль, а концентрации посторонних электролитов известны. Формальный потенциал в отличие от стандартного зависит от ионной силы раствора, а также от природы и концентрации посторонних электролитов.

Для измерения потенциала изучаемой полуреакции определяли ЭДС элемента, состоящего из электрода, на котором протекает исследуемая полуреакция, и электрода сравнения, потенциал полуреакции которого известен. В качестве электрода сравнения нами использован хлорид-серебряный электрод. Для изучаемых полуреакций применяли либо платиновый электрод, либо алюминиевый. Исследуемый электрод соединяли с помощью электролитического мостика с электродом сравнения. В результате получали исследуемый гальванический элемент. С помощью рН-метра измеряли разность потенциалов изучаемого электрода и электрода сравнения. Так как потенциал электрода сравнения известен, то можно рассчитать потенциал измеряемого электрода и следовательно, потенциал изучаемой полуреакции. Результаты измерений потенциалов электродов исследуемых полуреакций и ЭДС рассматриваемых реакций представлены в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Величины потенциалов изучаемых полуреакций

№	Уравнение полуреакции	Стандартное значение потенциала, Е°, в	Концентрация компонентов раствора, моль/л рН=5	Измеренное значение ЭДС, ΔЕ, в	Экспериментальное значение потенциалов Е <sub>ЭКСП</sub> , в
1	$\text{PbO}_2 + \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{PbC}_2\text{O}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1,41	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 0,1М 0,5М	-1,17 -1,10	1,39 1,32
2	$\text{PbO}_2 + \text{H}_2\text{Y}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow [\text{PbY}]^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	1,5	ЭДТА 0,05М 0,1М	-1,25 -1,32	1,47 1,54
3	$\text{Pb}_3\text{O}_4 + 3\text{H}_2\text{Y}^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3[\text{PbY}]^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$	2,34	ЭДТА 0,05М 0,1М	-2,1 -2,35	2,32 2,55
4	$\text{Pb}_3\text{O}_4 + 3\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{PbC}_2\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$	2,41	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 0,1М 0,5М	-2,15 -2,05	2,37 2,27
5	$\text{Al} + \text{H}_2\text{Y}^{2-} - 3\text{e}^- \leftrightarrow [\text{AlY}]^- + 2\text{H}^+$	-1,66	ЭДТА 0,05М 0,1М	1,2 1,96	-1,68 -1,74
6	$\text{Al} + 2\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 - 3\text{e}^- \leftrightarrow [\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^- + 4\text{H}^+$	-1,7	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 0,1М 0,5М	1,52 1,6	-1,3 -1,38

**Таблица 2.** Значение ЭДС изучаемых реакций

№	Уравнение окислительно-восстановительной реакции	Концентрация компонентов раствора, моль/л	Потенциал окислителя, Е <sub>ОК</sub> , в	Потенциал восстановителя Е <sub>ВОС</sub> , в	ЭДС реакции ΔЕ <sub>р</sub> , в
1	$3\text{PbO}_2 + 2\text{Al} + 7\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \leftrightarrow 3\text{PbC}_2\text{O}_4 + 2\text{H}[\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_2] + 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 0,1 М 0,5М	1,39 1,32	-1,3 -1,38	2,69 2,7
2	$3\text{PbO}_2 + 2\text{Al} + 5\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} + 2\text{HNO}_3 \leftrightarrow 3\text{Na}_2[\text{PbY}] + 2\text{Na}[\text{AlY}] + 2\text{NaNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$	ЭДТА 0,05М 0,1М	1,47 1,54	-1,68 -1,74	3,15 3,28
3	$3\text{Pb}_3\text{O}_4 + 2\text{Al} + 13\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \leftrightarrow 9\text{PbC}_2\text{O}_4 + 2\text{H}[\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_2] + 12\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 0,1 М 0,5М	2,37 2,27	-1,3 -1,38	3,67 3,65
4	$3\text{Pb}_3\text{O}_4 + 2\text{Al} + 11\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} + 2\text{HNO}_3 \leftrightarrow 9\text{Na}_2[\text{PbY}] + 2\text{Na}[\text{AlY}] + 2\text{NaNO}_3 + 12\text{H}_2\text{O}$	ЭДТА 0,05М 0,1М	2,32 2,55	-1,68 -1,74	4,00 4,29

На основании полученных результатов сделаны следующие *выводы*:

1. Рассмотренные окислительно-восстановительные системы (в качестве окислителей – диоксид свинца или сурик в слабокислотной среде с введением для повышения окислительной способности в изучаемые системы щавелевой кислоты

или ЭДТА) представляют интерес для разработки гальванических элементов с алюминиевым анодом.

2. Измерены потенциалы окислительно-восстановительных пар в слабощелочной среде. Рассчитаны стандартные электродные потенциалы изучаемых систем и значения ЭДС соответствующих окислительно-восстановительных реакций с участием алюминия.

3. Показана большая эффективность  $Pb_3O_4$  как окислителя для всех изученных систем с приоритетом в растворах 0,05М ЭДТА (ЭДС = 4,00В) и 0,1М ЭДТА (ЭДС = 4,29 В). Полученные данные могут быть использованы при разработке гальванических элементов с алюминиевым анодом.

УДК 546.56

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ С СУЛЬФАМИНОВОЙ КИСЛОТОЙ**

**С.А. Дружинин, А.В. Ковальчук, К.А. Куличкова**  
**Научный руководитель канд. техн. наук Н.М. Вострикова**

*Сибирский федеральный университет*

Финишной операцией производства меди является электролиз, основной получаемый продукт которого – катодная (чистая) медь. Основные примесные элементы концентрируются в электролизном шламе и электролите. Основу шлама составляют оксиды и сульфиды меди (I) и (II). В процессе хранения данного влажного промпродукта могут образовываться гидроксокарбонатные формы меди (II).

При очистке отработанных электролитов в осадке концентрируются гидроксиды меди и примесные элементы: железо, никель, цинк, олово, свинец и другие.

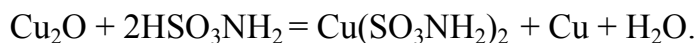
В связи с высоким содержанием ценных компонентов в шламах электролиза меди и гидроксидных осадках данные продукты необходимо перерабатывать.

Представляло интерес исследование поведения оксидных соединений меди в плане селективного их извлечения из многокомпонентных продуктов сложного состава с использованием сульфаминовой кислоты. Как было установлено ранее, данный реагент обеспечивает, например, аномально высокую растворимость оксидов свинца. В то же время, оксиды железа в сульфаминовой кислоте практически нерастворимы.

На первом этапе проведены исследования по изучению взаимодействия оксидов меди (I) и меди (II), основного карбоната меди и гидроксида меди с 10 %-ным раствором сульфаминовой кислоты, при соотношении Т : Ж = 1 : 20 при комнатной температуре. Масса вводимого вещества составляла 5 г, объем раствора – 100 мл. Продолжительность процесса взаимодействия – 30 мин. при постоянном механическом перемешивании пульпы. Растворимость соединений меди рассчи-

тивалась по убыли массы навески. Возможные изменения фазового состава нерастворимых осадков определялись рентгенофазовым анализом (РФА).

При взаимодействии  $\text{Cu}_2\text{O}$  с сульфаминовой кислотой в осадке обнаружена металлическая медь (100 %) (рис. 1). По-видимому, при растворении протекает взаимодействие:



Фазовый состав осадков при взаимодействии  $\text{CuO}$  и  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$  с сульфаминовой кислотой не изменился. Медь в форме  $\text{Cu}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$  переходит в раствор:

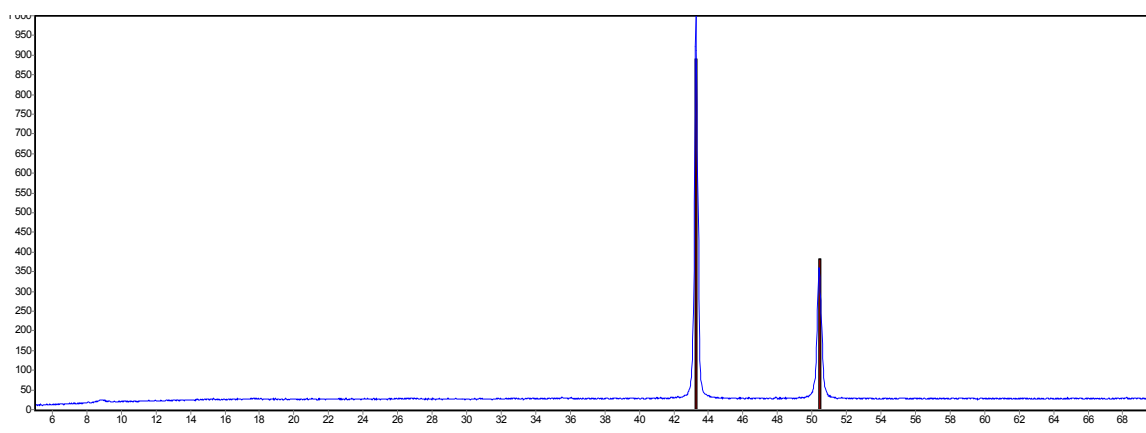
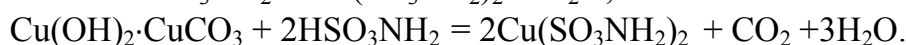
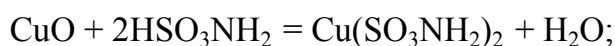


Рис. 1. Рентгенограмма нерастворимого остатка после растворения  $\text{Cu}_2\text{O}$  в сульфаминовой кислоте

Установлено, что максимальная концентрация меди в растворе сульфаминовой кислоты составляет (г/л): 11,2 при растворении  $\text{CuO}$ , 25,4 –  $\text{Cu}_2\text{O}$ , 17,0 –  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$  и 18,9 –  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ .

Изменение массы навески соединений меди в растворе сульфаминовой кислоты представлено в таблице.

**Таблица.** Изменение массы навески соединений меди в растворе сульфаминовой кислоты ( $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $T: \text{Ж} = 1:20$ ,  $\tau = 30$  мин.,  $C(\text{HSO}_3\text{NH}_2) = 10\%$ )

Вещество	Исходная масса, г	Конечная масса, г	Степень перехода в раствор, %
$\text{CuO}$	5	3,6	28
$\text{Cu}_2\text{O}$	5	2,14	57
$\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$	10	4,1	59
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	8,9	3,66	59

Наибольшая растворимость в сульфаминовой кислоте наблюдается у  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$  и  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , достигая 59 % (рис. 2).

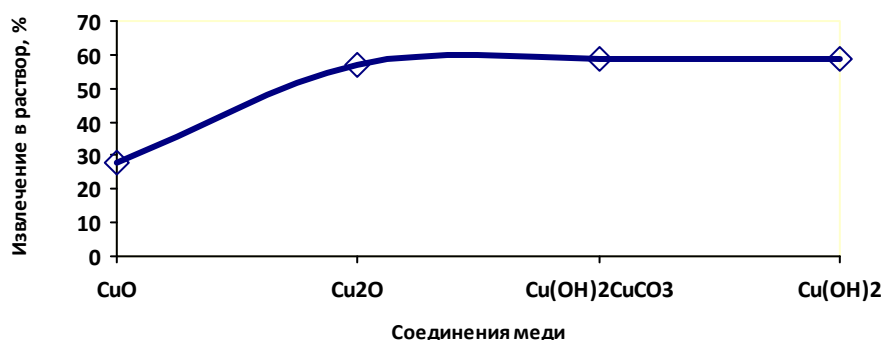


Рис. 2. Степень извлечения меди в раствор сульфаминовой кислоты

Таким образом, при взаимодействии оксидных соединений меди с сульфаминовой кислотой лучшая растворимость наблюдается у  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$  и  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , при этом фазовый состав осадка не изменяется. При растворении  $\text{Cu}_2\text{O}$  в растворе сульфаминовой кислоты происходит образование металлической меди, что подтверждается рентгенофазовым анализом.

УДК 620.22:621.763

## НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ВОДОРАСТВОРИМЫХ СОЛЕЙ В ГЛИНИСТОМ СЫРЬЕ

**Б.О. Аполлонов, А.А. Шемякова, Н.М. Рукосуева**  
**Научные руководители канд. техн. наук Н.М. Вострикова,**  
**канд. техн. наук Э.М. Никифорова, Р.Г. Еромасов**

*Сибирский федеральный университет*

В глинистых породах, используемых для производства керамического кирпича, довольно часто обнаруживаются вредные примеси в виде водорастворимых солей —сульфатов, что создает значительные затруднения в производстве строительной керамики. Сульфаты натрия, магния, кальция, железа вызывают выпцветы на изделиях, образуя соляной налет на высушенных глиняных изделиях. Белые налеты на кладке — результат кристаллизации солей на поверхности кирпича [1]. Кристаллизации предшествует движение водно-солевых растворов в порах материала с последующим выходом их на поверхность. Пористость же на самом деле является необходимым условием для теплоизоляции помещений и нормального парообмена здания.



Помимо ухудшения внешнего вида изделий, растворимые соли в керамическом кирпиче исключают возможность оштукатуривания стены из-за отслаивания штукатурного слоя. Сульфаты способны образовывать двойные соли, которые выступают на поверхности обожженных изделий: астраханит  $\text{MgSO}_4$ , полигалит  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  и т. д. [1, 2].

В работе исследованы глины Садового, Бадалыкского и Кантатского месторождений, используемые в производстве керамического кирпича в г. Красноярске. Изученный химический и минералогический состав глин свидетельствует о наличии в их составе сульфат-ионов.

Химический и минералогический состав глин приведен в табл. 1 и 2.

**Таблица 1.** Химический состав исходного глинистого сырья, масс. %

Наименование сырья	Содержание оксидов								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	п.п.п.
Суглинок садовый	54,02	13,61	-	6,60	8,17	3,22	2,44	1,95	9,99
Суглинок бадалыкский	57,38	13,84	0,20	6,40	5,33	2,82	3,22	2,20	8,34
Глина кантатская	66,65	16,02	0,18	2,88	0,50	1,50	1,00	0,56	10,71

**Таблица 2.** Минералогический состав исходного глинистого сырья, %

Наименование сырья	Содержание минералов									
	Каолинит	Монтмориллонит	Гидролюда	Хлорит	Кварц	Полевой шпат	Карбонаты	Слюда	Гидрооксиды железа	Органическое вещество
Суглинок садовый	15–20	23–25	10–12	1–2	15–20	7–10	10–15	2–3	3–5	5–6
Суглинок бадалыкский	5	40–45	5–7	–	10–15	10–13	10–11	2–3	2–3	4–5
Глина кантатская	45–47	–	25–27		5–6	5–7	3–5	4–5	2–3	3–5

Исследуемое глинистое сырье (по 100 г) разбавлено водой в количестве 1:10, через 24 ч отфильтровано трижды по 100 мл для каждого сырья.

В полученные растворы добавлено по 2 мл соляной кислоты, приготовленной разбавлением водой двухосновной соляной кислоты в пропорции 1:1, а также по 2 капли метилоранжевого. Полученные растворы нагревали до кипения. Приготовление концентрированного хлористого бария осуществлялось путем разбавления 44,6 г в 10 мл воды и доведения до кипения, смешивания подготовленных компонентов, отстаивания в течение 24 ч, фильтрации и последующего прокаливания фильтров при 900 °С в течении 15 минут [3].

Для вычисления массы сульфата бария использовали формулу:

$$X = \frac{m \cdot K \cdot 0,412}{0,048},$$

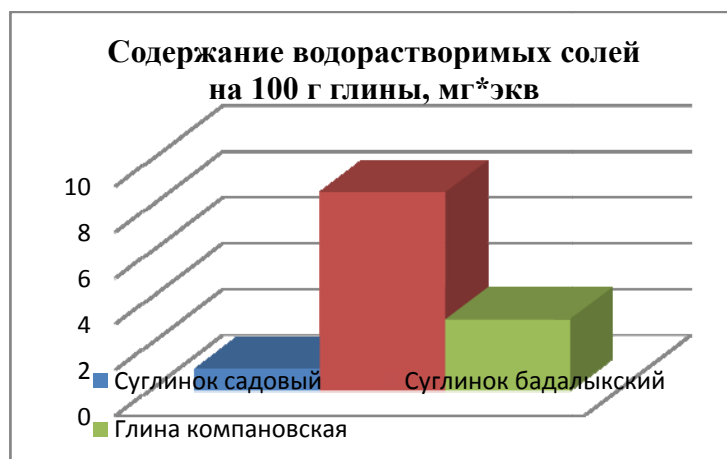
где  $m$  – масса осадка сульфата бария, г ;  $K$  – коэффициент пересчета на 1 дм<sup>3</sup>; 0,412 – фактор пересчета сульфата бария на сульфат-ион; 0,048 – коэффициент пересчета весовой единицы, мг\*экв./л.

Содержание водорастворимых солей на 100 г глины для исследованного сырья приведено в табл. 3 [4].

**Таблица 3.** Содержание водорастворимых солей

Наименование сырья	Содержание водорастворимых солей на 100 г глины, мг*экв.	Содержание водорастворимых солей на 100 г глины, мг*экв. в соответствии с ГОСТ 9169-75	Классификация сырья по ГОСТ 9169-75
Суглинок садовый	0,97	1–5	С низким содержанием
Суглинок бадалыкский	8,67	5–10	Со средним содержанием
Глина компановская	3,12	1–5	С низким содержанием

Сравнительная оценка содержания водорастворимых солей в глинах месторождений Красноярского края приведена на рис. 1.



*Рис. 1. Гистограмма содержания водорастворимых солей в исследуемом сырье*

Изучены разнообразные методы борьбы с негативным воздействием сульфат-ионов на качество готовых керамических изделий. Выявлено, что весьма эффективным способом борьбы с выцветами является введение в состав керамической шихты тонкомолотого витерита-карбоната натрия, имеющего достаточно широкое распространение в Сибири. Благодаря обменной реакции  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{BaCO}_3$

= BaSO<sub>4</sub>+ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ионы SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> остаются в глине связанными, а растворимый карбонат натрия легко реагирует с глинистыми минералами, не образуя при этом белесоватые пятна. Имеются рекомендации по замене витерита фторидом бария, фторсиликатом бария с добавлением хлорида натрия [1].

Представленные фотографии образцов свидетельствуют об эффективности предложенного способа нейтрализации водорастворимых солей за счет введения в состав шихты витерита (рис. 2).



Рис. 2. Образцы керамических материалов с добавкой витерита (а) и без добавок в шихту (б)

С учетом проведенной исследовательской работы рекомендовано, помимо введения корректирующей добавки, осуществлять быстрый подъем температуры в печи до 600 °С с целью избежания образования сульфатов из сернистого газа и оснований, идущих при 400–500 °С. Положительное влияние может оказать восстановительный обжиг в интервале 700–800 °С с целью разложения сульфатов. Для этого целесообразно введение в состав шихты углистых компонентов.

### Список литературы

1. Кондратенко В. А. Керамические стеновые материалы: оптимизация их физико-технических свойств и технологических параметров производства. М.: Композит, 2005. 508 с.
2. Никифорова Э. М. Санитарно-техническая и строительная керамика: метод. указания к лаб. работам для студ. спец. 110800 «Композиционные и порошковые материалы, покрытия» / сост. Э. М. Никифорова, А. Ф. Шиманский. Красноярск, 1999. 44 с.
3. ГОСТ 9169-75. Сырье глинистое для керамической промышленности. Классификация. Введен 01.07.76. М.: Стандартиформ, 2001. 6 с.
4. ГОСТ 21216.8–93. Сырье глинистое. Метод определения сульфат-ионов в водной вытяжке. Введен 01.01.1995. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1995. 6 с.

## ВНУТРИПРОФИЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ (НА ПРИМЕРЕ БЕРЕЗОВОЙ РОЩИ СТУДЕНЧЕСКОГО ГОРОДКА)

Н.Ю. Лунева

Научный руководитель канд. хим. наук М.П. Прокушкина

*Сибирский федеральный университет*

Почва – природное образование, состоящее из генетически связанных горизонтов, формирующееся в результате преобразования поверхностных слоев литосферы под воздействием воды, воздуха и живых организмов. Главным свойством почв является неразрывная связь входящих в нее живых и неживых компонентов, поэтому почва, согласно В. И. Вернадскому, считается «биокосным телом».

Сочетание факторов почвообразования, под воздействием которых формируются почвы, одинаково для любого района нашей страны и Земли в целом и включает в себя почвообразующие (материнские) породы, зеленые растения, микроорганизмы и животные организмы, климат, рельеф территории, возраст почв (время почвообразования) и производственную деятельность человека. Конкретное количественное и качественное проявление этих факторов (главным образом – первых четырех) примерно одинаково для той или иной территории со сходными природными условиями, на которой именно поэтому формируется группа почв, близких по внешнему облику, химическим и физическим свойствам.

Для Красноярской биоклиматической подзоны доминирующими являются серые лесные почвы – самостоятельный зональный тип, сформировавшийся под травянистыми широколиственными лесами в условиях лесостепной зоны.

В вертикальном разрезе генетические горизонты данного типа почв внешне хорошо различимы:

- **O** – *лесная подстилка*, маломощная (до 3–5 см);
- **A<sub>h</sub>** – *гумусовый горизонт серого цвета, маломощный (15–30 см), густо пронизан корнями растений, образующими в верхней части дернину*;
- **A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>** – *гумусово-элювиальный* горизонт, светло-серого цвета; в тёмно-серых лесных почвах может отсутствовать;
- **B<sub>1</sub>** – *элювиально-иллювиальный* горизонт серовато-бурого или серовато-коричневого цвета;
- **B<sub>2</sub>** – *иллювиальный* горизонт, буровато-коричневого цвета. По степени выраженности названных признаков может подразделяться на горизонты B<sub>1</sub> и B<sub>2</sub>;
- **BC** – *переходный* горизонт от иллювиального к материнской породе;
- **C<sub>k</sub>** – *материнская порода*.

Изменение химического состава почвы по профилю проявляется в двух формах: абсолютном накоплении или потере элемента за счет переноса его соеди-

нений в пределах почвенного профиля и относительном накоплении (потере) элемента вследствие потери (накопления) в данном горизонте других химических элементов.

Целью данной работы являлось определение химического состава водных вытяжек почвенных профилей и рассмотрение пространственной вариации содержания подвижных форм макроэлементов в серых лесных почвах березовой рощи Студенческого городка.

Для реализации поставленной задачи, образцы почв отбирали на трансекте: автомобильная дорога на ул. Киренского – спорткомплекс СФУ в семи точках на расстоянии примерно 50 м друг от друга (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема местности отбора проб

Содержание химических элементов определяли в водной вытяжке почвы методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой в ЦКП СФУ.

На рис. 2 (а–е) представлены изменения концентраций макроэлементов по почвенным профилям (средние значения по соответствующим горизонтам всех семи разрезов).

В ходе работы были выявлены следующие закономерности.

Максимальные концентрации подвижных форм элементов наблюдаются в горизонте опада (исключение составляют алюминий (рис. 2а) и натрий (рис. 2б)). Среди доминирующих катионов можно выделить калий (более 3 мг/кг почвы (рис. 2в)), кремний (около 3 мг/кг (рис. 2г)), кальций (около 1,5 мг/кг (рис. 2д)) и железо (около 1,2 мг/кг, рис. 2е). Достаточно высокими являются и содержания бария, цинка, марганца и магния.

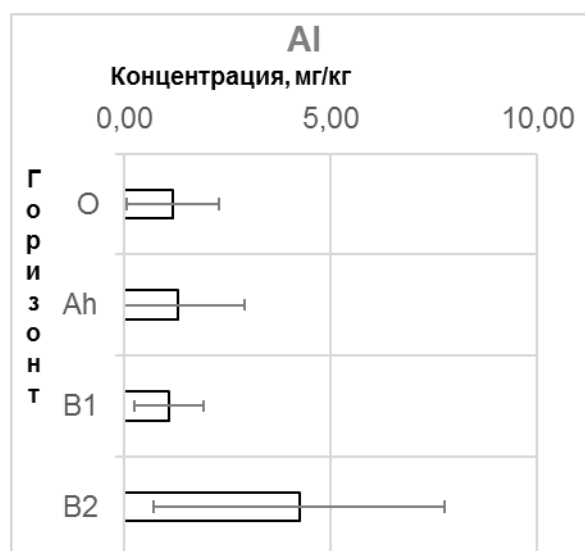
Далее вниз по почвенному профилю наблюдается устойчивое снижение концентраций подвижных форм всех вышеприведенных элементов, за редким исключением (кремний и натрий). Минимальными концентрациями подвижных форм характеризуется горизонт В<sub>1</sub>, что, вероятно, связано с интенсивным выветриванием минералов. Таким образом, можно заключить, что данный горизонт представляет собой горизонт вымывания (элювиальный), как правило, находящийся на глубине 20–30 см.

Как следствие, в нижележащем горизонте В<sub>2</sub> наблюдаются повышенные концентрации подвижных форм исследованных элементов, в особенности пред-

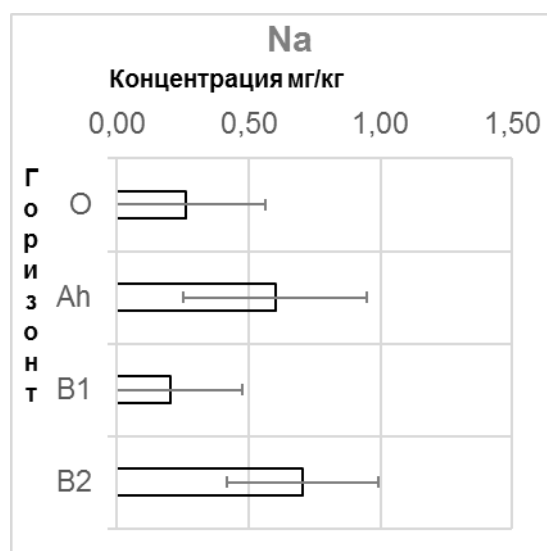
ставляющих глинистые минералы и оксигидроксиды: железа, алюминия, кремния, марганца, а также элементов, связанных с коллоидными формами: бария, кальция, магния и цинка.

Содержание калия (рис. 2в), как наиболее подвижного элемента, ничтожно мало и не превышает 0,2 мг/кг почвы.

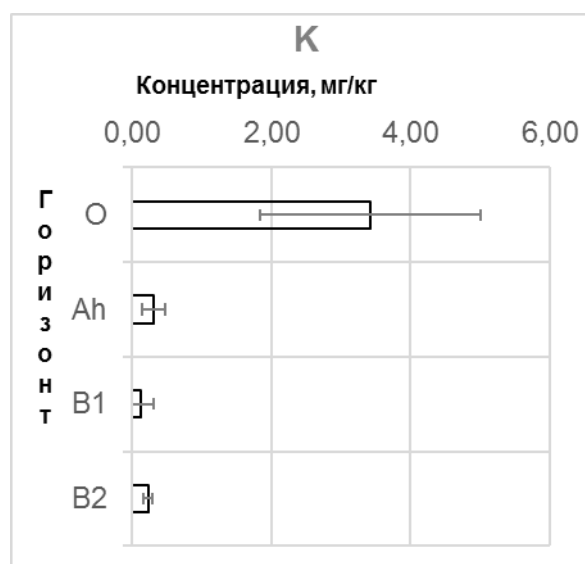
Поведение натрия остается относительно неясным, а именно: пики его содержания в горизонте гумификации и иллювиальном горизонте B<sub>2</sub>, по всей видимости, свидетельствующие об определенном загрязнении натрием (подсыпка дорог в зимнее время). В силу промывного режима горизонта B<sub>1</sub> в нем наблюдается наименьшее содержание этого элемента.



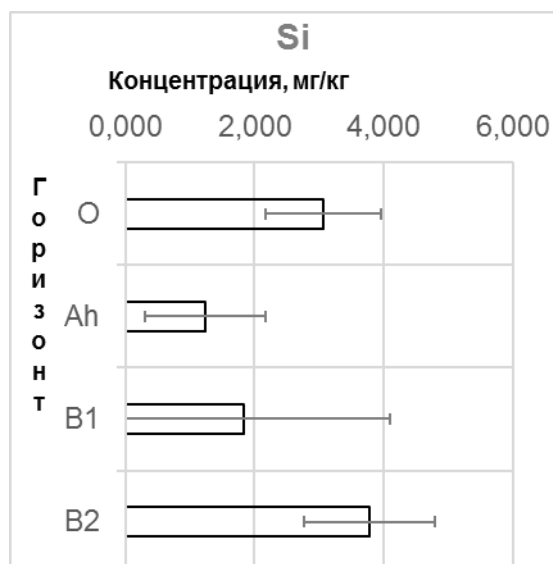
*а*



*б*



*в*



*г*

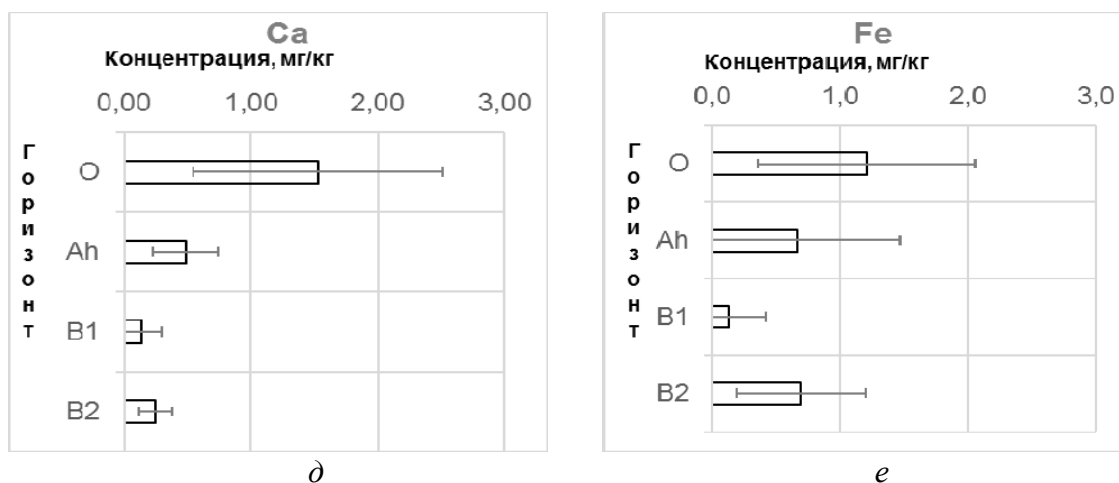


Рис. 2. Содержание элементов по глубине почвенного профиля

Представленные данные по внутрипрофильному распределению подвижных форм макроэлементов дают типичную картину для серых лесных почв: закономерно повышенные содержания элементов в верхних органогенных горизонтах почв, отражающие их поступление с растительным опадом; снижение концентраций элементов по профилю; минимальные величины в элювиальном горизонте и, наоборот, накопление в иллювиальном.

Повышенные количества натрия и отличие его поведения от поведения аналога – калия, по всей видимости, вызвано применением соляных песчаных смесей для подсыпки дорог в зимнее время или спецификой материнской породы.

### Список литературы

1. Семина Е. В. Серые лесные почвы Красноярской лесостепи и некоторые вопросы их генезиса. Почвоведение. 1961. № 1.
2. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв: 1-е изд. М., 1961. 432 с.; 2-е изд. М., 1970. 487 с.
3. Озерский А. Ю. Основы геохимии окружающей среды: учеб. пособие. Красноярск: ИПК СФУ, 2008. 316 с.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Р.И. Московкина, Т.Д. Бережная**

**Научные руководители канд. техн. наук Г.С. Саначева,  
канд. техн. наук И.В. Дубова**

Концепция устойчивого развития подразумевает экологически чистое производство продукции во всех сферах жизни общества. В России разработана государственная программа по охране окружающей среды 2012–2020, которая включает и экологические проблемы металлургического производства; совершенствуются стандарты ИСО для металлургии.

Отходы литейного производства, выбросы в атмосферу пагубно влияют на экологическое равновесие. Широкая химизация технологических процессов создает опасность загрязнения окружающей среды токсичными веществами, которые попадают в воздушную среду, сточные воды и отвалы.

Для решения экологических проблем необходим мониторинг экологического состояния металлургических предприятий: анализ используемых химических веществ в рамках технологий, видов отходов и их составов, объемов отходов и способов их утилизации.

Данная статья посвящена анализу литейных технологий (табл. 1).

**Таблица 1.** Структура отходов литейного производства

Технологические процессы литейного производства	Виды отходов	Компоненты
Приготовление сплавов	<i>Пыль</i>  <i>Аэрозоли металлов пара</i>  <i>Отходящие газы</i> <i>Шлаки, шламы</i>	SiO <sub>2</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MnO <sub>3</sub> , MnO, MgO, CrO <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PbO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, HF, NaF, AlF <sub>3</sub> Аэрозоль меди Аэрозоли оксидов лития и кадмия Аэрозоли оксидов лития и магния Аэрозоли оксидов железа и марганца CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> Солевые шлаки: NaCl, KCl Оксидные Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>
Подготовка и использование формовочных материалов и смесей	<i>Пыль</i> <i>Отходящие газы</i>	SiO <sub>2</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> Цианиды, пары углеводородов, формальдегида, ацетона, метанола, бензола, фенолформальдегида, фенола, фурфурола, ароматических изоцианатов, акриловой кислоты, фуриловый спирт, гидроксикарилаты, амины



Регенерация формовочных и стержневых смесей	Пыль Отходы стержневых смесей	SiO <sub>2</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O (смеси с остатками смол)
Финишные операции	Пыль Остатки формовочных смесей	SiO <sub>2</sub> , CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O

Технологические процессы изготовления отливок характеризуются большим числом операций, при выполнении которых выделяются пыль, аэрозоли и газы.

Так к примеру при работе вагранок на каждую тонну чугуна приходится 1000 м<sup>3</sup> выбрасываемых в атмосферу газов, содержащих от 3 до 20 г/м<sup>3</sup> пыли. Пыль образуется также при приготовлении и регенерации формовочных и стержневых смесей, внепечной обработке сплавов, на участке финишных операций. Твердые отходы литейного производства – это отработанные формовочные и стержневые финишные операции 2–3 %. В воздушной среде литейных цехов, кроме пыли, в больших количествах находятся газы 5–20 % оксида углерода, 5–17 % углекислого газа и до 0,5 % сернистого газа, от 70 до 80 % азота и его оксидов, 1,7 % водорода, аэрозоли, насыщенные оксидами железа и марганца, пары углеводородов и др. В водный бассейн поступает до 3 куб. м сточных вод и вывозится в отвалы до 6 т отработанных формовочных смесей.

Применение органических связующих при изготовлении стержней и форм приводит к значительному выделению токсичных газов в процессе сушки и особенно при заливке металла. В зависимости от класса связующего в атмосферу цеха могут выделяться такие вредные вещества, как аммиак, ацетон, акролеин, фенол, формальдегид, фурфурол и т. д. При изготовлении форм и стержней с тепловой сушкой и в нагреваемой оснастке загрязнение воздушной среды токсичными компонентами возможно на всех стадиях технологического процесса: при изготовлении смесей, отверждении стержней, при заливке и охлаждении форм.

Очевидно, в условиях литейного производства проявляется неблагоприятный кумулятивный эффект комплексного фактора, при котором вредное воздействие каждого отдельного ингредиента резко увеличивается.

Ниже приведены данные по токсичному воздействию на человека основных вредных выбросов литейного производства:

**Таблица 2.** Вредные вещества в литейном производстве и их влияние на организм человека

Вещество	Класс опасности	Действие на организм
Оксид углерода	4	Вытесняет кислород из оксигемоглобина крови, что препятствует переносу кислорода из лёгких к тканям; вызывает удушье, оказывает токсическое действие на клетки, нарушая тканевое дыхание, и уменьшает потребление тканями кислорода
Оксиды азота	2	Оказывают раздражающее действие на дыхательные пути и кровяные сосуды

Формальдегид	2	Общеядовитое вещество, вызывающее раздражение кожи и слизистой оболочки
Бензол	2	Оказывает наркотическое, отчасти судорожное действие на центральную нервную систему; хроническое отравление может привести к смерти
Фенол	2	Сильный яд, оказывает общетоксическое действие, может всасываться в организм человека через кожные покровы
Бензопирен $C_{20}H_{12}$	4	Канцерогенное вещество, вызывающее генные мутации и раковые заболевания. Образуется при неполном сгорании топлива. Бензопирен обладает высокой химической стойкостью и хорошо растворяется в воде, из сточных вод распространяется на большие расстояния от источников загрязнений и накапливается в донных отложениях, планктоне, водорослях и водных организмах

Эгоцентрический подход к природопользованию губителен для природных комплексов. Ужесточение экологических стандартов побуждает предприятия вкладывать средства в защиту окружающей среды и создавать металлургические производства новых поколений. С целью улучшения экологической обстановки в последние годы внедряются новые эффективные литейные технологии, реализуются наиболее экологичные подходы к изготовлению литейных форм и стержней, совершенствуются технологии утилизации отходов.

## ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 502.521

### ЦЕЛЛЮЛОЗОРАЗЛАГАЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ В ПИХТАРНИКАХ, ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРОЕДОМ (*Polygraphus proximus* Blandford)

**Т.Е. Бочарова**

**Научный руководитель д-р биол. наук И.Н. Безкоровая**

*Сибирский федеральный университет*

Вспышки энтомофагов являются одним из сильнейших факторов динамики лесных сообществ. Первые сведения о местонахождении короеда в Красноярском крае появились в 2010 г. в Козульском и Боготольском районах.

В настоящее время наиболее изучено развитие популяций вредителей с позиций энтомологии и взаимоотношений с деревом-хозяином. Вспышки энтомофагов провоцируют сукцессии растительного покрова, что в свою очередь не может не отражаться на всех компонентах лесного сообщества, в том числе почве и ее живой фазе. Однако данных о влиянии последствий вспышек энтомофагов на отдельные свойства почвы, включая ее биологическую активность в научной литературе крайне мало.

Исследование биологической активности почв способствует пониманию особенностей взаимоотношения отдельных компонентов экосистемы и раскрывает ее потенциальные возможности для восстановления нарушенного природного равновесия под влиянием биотических факторов.

Цель данной работы – оценка целлюлозоразлагающей активности почв в пихтарниках, поврежденных короедом (*Polygraphus proximus* Blandford).

Исследования проводились в пихтарниках, поврежденных короедом в рамках комплексных исследований. Возраст очага составляет 3–4 года. В очаге распространения короеда на территории Кемчугского лесничества (N056o11,317'E092o12,370'; N 056o10,542'E092o12,915') заложены две пробные площади размером 50\*50 м, отражающие разную степень повреждения древостоя короедом. Территория относится к южной тайге.

ПП1 – пробная площадь со 100 %-ным повреждением древостоя короедом;

ПП2 – пробная площадь, с единичным повреждением древостоя короедом.

Почвенный покров пробных площадей представлен подзолистой глееватой почвой суглинистого и среднесуглинистого гранулометрического состава (по данным Красноярского центра защиты леса).

Актуальная целлюлозоразлагающая активность почвы оценивалась с помощью аппликационного метода Е. Н. Вострова и А. Н. Петровой (1961). Исследования проводились в период с сентября по май («холодный период») и в период с июня по август – «летний период». На каждой пробной площади было заложено по 12 хлопчатобумажных полотен под подстилку и в минеральную часть почвы на «холодный период» года, а также 12 полотен на «летний период». Потенциальную целлюлозоразлагающую способность определяли с трехкратной повторностью путем компостирования подстилки и почвы в оптимальных условиях температуры и влажности (60 % от полной влагоемкости, при температуре 28 °C). Интенсивность целлюлозоразлагающей активности оценивали по % потери целлюлозы при разложении.

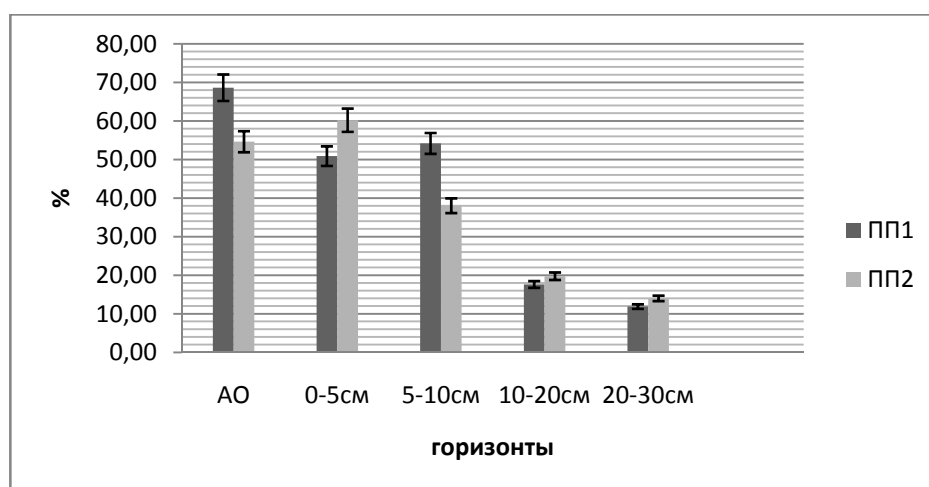
Целлюлозоразлагающая активность почв является отражением минерализационных и деструкционных процессов, осуществление которых главным образом обуславливается определенным уровнем и соотношением активности ферментов.

Актуальная целлюлозоразлагающая активность характеризует функционирование почвенных организмов в реальных экологических условиях, потенциальная активность, обусловленная активностью ферментов, продуцируемых почвенной биотой в оптимальных условиях – скрытую способность почвы вызывать ряд биологических процессов.

Нарушение экологической обстановки после появления в экосистеме вредителя обуславливает изменения запасов и фракционного состава подстилок (увели-

чение доли лиственного опада за счет формирующегося под пологом подлеска) и увеличение инсоляции поверхности. Все это не может не отражаться на актуальной целлюлозоразлагающей способности почв. По активности целлюлозоразлагающих микроорганизмов верхний слой почвы, включая подстилки и минеральный слой почвы в пихтарнике со 100 %-ным повреждением древостоя, близки между собой (62–67 %). Отмечены сезонные различия биологической активности исследованных почв: за «холодный период» потеря целлюлозы при разложении в естественных условиях составила 36–43 %, в «летний период» активность в два–три раза выше (80–98 %). Пихтарник с единичным повреждением древостоя короедом характеризуется различной активностью целлюлозоразложения в верхнем слое почвы, включая подстилки и минеральный слой почвы (25–50 %). Потеря целлюлозы в различные периоды года («холодный» и «летний») в пихтарнике с единичным повреждением составила 36–39 %.

Потенциальная активность целлюлозоразложения в короедниках в разной степени поврежденных различается незначительно и составляет 37–40 % за две недели экспозиции в оптимальных условиях температуры и влажности. Анализ результатов разложения целлюлозы по слоям почвы показал, что в исследованных пихтарниках потенциальная целлюлозоразлагающая активность снижается с глубиной – от 38–68 % в верхнем слое почвы, включая подстилки, до 11–14 % в минеральном слое почвы 20–30 см. Причем максимальной потенциальной активностью характеризуется почва пихтарника со 100 %-ным повреждением древостоя (рисунок).



*Рис. Потенциальная активность целлюлозоразложения почвы, % потери веса целлюлозы за 10 дней компостирования. ПП1- пробная площадь со 100% повреждением древостоя короедом; ПП2- пробная площадь, с единичным повреждением древостоя*

В подстилках ненарушенных пихтарников до 30 % состава приходится на опад хвои, веток, коры, являющихся достаточно инертным для биотрансформации материалом. Этим, скорее всего, объясняется более низкая потенциальная активность целлюлозоразложения верхнего слоя почвы, включая подстилки, в пихтарнике с единичным повреждением древостоя.

Актуальная целлюлозоразлагающая активность почвы в пихтарниках, в разной степени поврежденных, значительно ниже потенциальной. Различие составляет около 31–34 %. Потенциальная биологическая активность является одной из важных характеристик устойчивости почв к различным деструктивным процессам в экосистемах, в том числе инициированным древесными вредителями.

Характер трансформации почвенных свойств пихтовых лесов, поврежденных короедом, в значительной мере обусловлен направленностью сукцессий на почвенного растительного покрова, развитием подлеска и увеличением количества листового и травянистого опада, а также увеличением древесного опада и периодом восстановления коренных древесных пород.

Осветление древесного полога и увеличение инсоляции поверхности в связи с повреждением пихтарников короедом, изменение фракционного состава и запасов подстилок обуславливает изменение целлюлозоразлагающей способности подзолистой глееватой почвы как одного из интегральных показателей почвенной биологической активности.

Потенциальная целлюлозоразлагающая активность почв более чем в 6 раз превышает актуальную, что отражает высокую буферную способность подзолистой глееватой почвы и ее устойчивость к различным, в том числе и биогенным, нарушениям. Выявлены различия в целлюлозоразлагающей активности подстилок и минеральных слоев почвы. Максимальная активность целлюлозоразложения показана за «летний период» для пихтарника со 100 %-ным повреждением древесного, а за «холодный период» – для пихтарника с единичным повреждением.

УДК 573.6

## **ОЧИСТКА ПОЧВ ОТ МЕДИ ПРИ ПОМОЩИ ОСОКИ БОЛЬШЕХВОСТОЙ**

**А.А. Глекнер**

**Научный руководитель канд. биол. наук Н.В. Пахарькова**

*Сибирский федеральный университет*

Влияние человеческой деятельности на миграцию и перераспределение химических элементов в биосфере можно сравнить с геологическими процессами. Особое место среди загрязнений занимают тяжелые металлы, тяжелые металлы – это группа химических элементов, имеющих плотность более 5 г/см<sup>3</sup>, к ним относятся химические элементы с атомной массой свыше 40. Тяжелые металлы среди химических элементов наиболее токсичны. Основные источники антропогенного поступления тяжелых металлов в атмосферу, гидросферу и почву – это металлургические предприятия, тепловые электростанции, а также автомобильный транспорт. Тяжелые металлы попадают в организм человека из растительной пищи, а

та, в свою очередь, аккумулирует их из почвы. Тяжелые металлы, попадая в организм человека, накапливаются в печени и почках и практически не выводятся из организма. Учитывая, что в последние годы многократно увеличилось число автомобилей, выбросов металлургических предприятий и предприятий ТЭЦ, рассеивающих тяжелые металлы в атмосфере, которые оседают на сельскохозяйственных угодьях, а также и использование удобрений, содержащих тяжелые металлы, проблема загрязнения почв тяжелыми металлами очень актуальна для сельского хозяйства.

Целью данной работы является изучение способности растений аккумулировать тяжелые металлы из почв, тем самым очищая их. В качестве поллютанта была использована медь, а в качестве растения-аккумулятора была выбрана осока болотная (*Carex macroura* Meish).

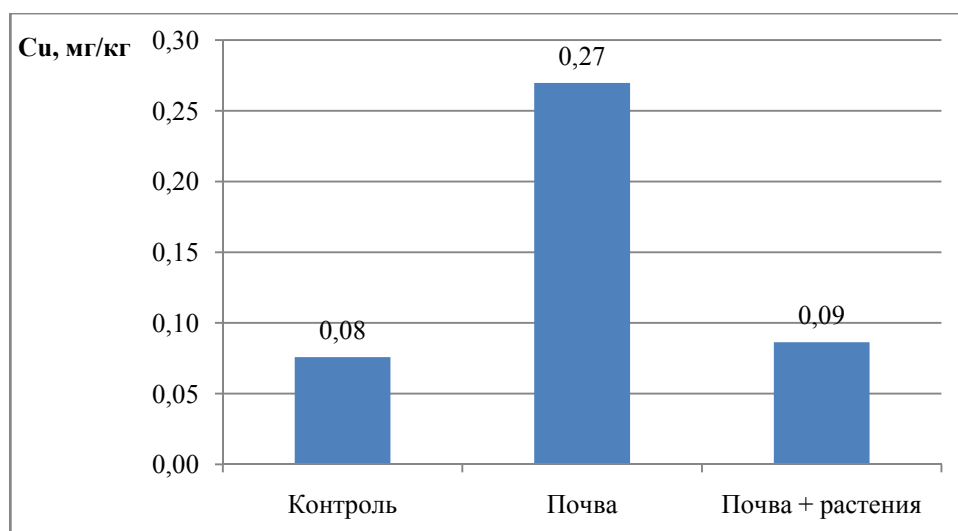
Для проведения исследования нами было заложено 9 пробных площадок площадью 0,25 м<sup>2</sup> каждая. Площадки были разбиты на три группы: 3 площадки «контроль», 3 площадки «почва», с которых были срезаны все растения; это сделано с целью узнать, способна ли почва самоочищаться, и 3 площадки «почва + растения». Проведено геоботаническое описание 3 площадок «контроль». ПДК меди для почв составляет 23 мг/кг. Для эксперимента было принято решение превысить ПДК в 10 раз. Медь вносили в виде раствора CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O. Затем с каждой площадки были взяты образцы из верхнего органического горизонта и произведена подготовка проб. Для проведения анализов на физико-химические свойства образцов почв необходимо просеять образцы через сито диаметром 1 мм, затем полностью очистить пробу от растительных остатков, это необходимо, чтобы минимизировать погрешность в весе пробы, а также при анализе на общий углерод. С площадок «контроль» и площадок «почва + растения» были срезаны наземные органы всех растений. Растения с площадки «контроль» необходимы для определения фонового содержания меди, растения с площадок «почва + растения» – непосредственно для определения способности растений поглощать и концентрировать тяжелые металлы из почвы.

Для определения подвижных форм меди к 5 граммам навески почвы добавили 30 мл дистиллированной воды, размешали и поставили в шейкер на сутки. Затем раствор был отфильтрован, а фильтрат был отправлен на анализ. Образцы растений были тщательно измельчены и растворены в перексиде водорода 38 % с добавлением 4 капель азотной кислоты. Затем полученный раствор также был отфильтрован, а фильтрат отправлен на анализ.

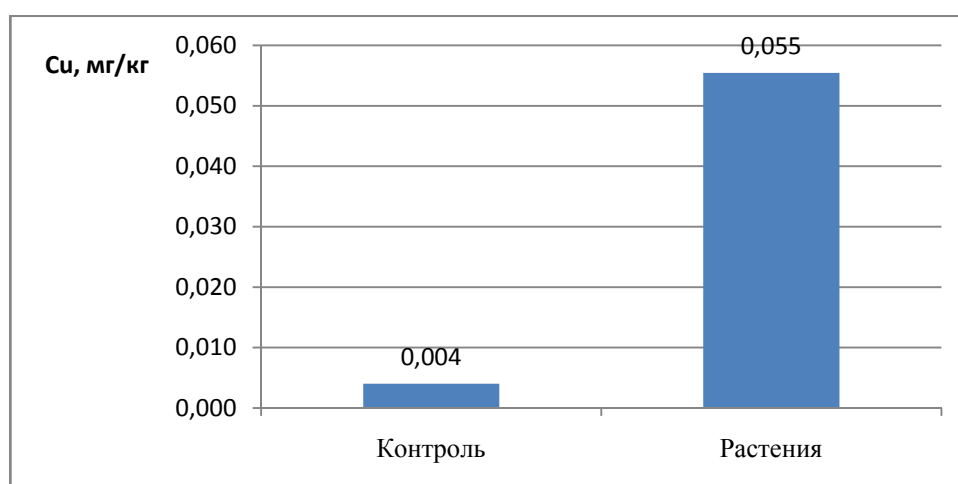
После проведения химических анализов проб почвы и растений были получены сведения о содержании меди. Так, на площадке «контроль» содержание меди составило 0,08 мг/кг, на площадке «почва» содержание меди – 0,27 мг/кг, и на площадке «почва + растения» содержание меди – 0,09 мг/кг (рис. 1).

Как видно из полученных результатов, содержание меди на площадке «почва» превысило фоновое значение чуть больше чем в 3 раза. На площадке «почва + растения» мы видим, что содержание меди практически сравнилось с фоновым.

Содержание меди в наземных частях растений на площадке «контроль» – 0,004 мг/г, а на площадке «почва + растения» – 0,055 мг/г. что превысило фоновое значение практически в 14 раз (рис. 2).



*Рис. 1. Содержание подвижных форм меди в почве*



*Рис. 2. Содержание меди в растениях*

По итогам эксперимента можно сделать вывод о том, что осока большехвостая является хорошим аккумулятором меди. И, как следствие, осока может хорошо использоваться для очистки почв от тяжелых металлов и меди в частности. Учитывая, что осока не требует каких-либо сложных мероприятий по уходу, это растение может являться очень дешевым способом для очистки почв вокруг предприятий и других источников загрязнения тяжелыми металлами.

## **ПОЧВЕННО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЗАПОВЕДНИКА «СТОЛБЫ»**

**О.О. Телешева**

**Научный руководитель канд. геогр. наук И.В. Борисова**

*Сибирский федеральный университет*

Почва является средой, неотрывно связанной как с животными и растительными организмами, так и непосредственно с человеком. Поэтому изучение геохимических процессов, протекающих в почве, и выявление тех причин, от которых зависит фактическое содержание химических элементов, является достаточно актуальным.

Научные исследования на территории заповедника «Столбы» начались с момента его образования и касались главным образом фитоценозов. Изучению почвенного покрова Восточного Саяна и примыкающей к заповеднику с севера лесостепи посвящалось достаточно работ, но изученность почвенного покрова северо-западных отрогов остается крайне слабой. На территории заповедника «Столбы» подробное описание почвенного покрова было произведено С. А. Коляго (1961).

Объектом исследования явился почвенный покров темнохвойной тайги северо-западных отрогов Восточного Саяна. Абсолютные высоты в изучаемой части не превышают 700–800 м над уровнем моря. Растительность данной территории представлена темнохвойной тайгой с преобладанием в древостое пихты и сосны, иногда встречаются кедр и ель.

Цель исследования заключается в изучении почвенно-геохимических условий северо-западной части Восточного Саяна.

Для изучения основных особенностей почвенно-геохимической структуры территории использовался катенарный метод с выделением элювиальных, трансэлювиальных, трансэлювиально-аккумулятивных и супераккумулятивных фаций [1].

В ходе полевых исследований описание макроморфологических свойств почв и почвообразующих пород выполнялось в соответствии со стандартной методикой изучения почв и подстилающих пород [2]. Почвенные разрезы закладывались на пробных площадях, в наиболее типичном для данного типа леса местобитаниях. Диагностика почв проводилась с использованием классификации и диагностики почв России [3]. Основными диагностическими горизонтами были грубогумусовый (АО) и плотная почвообразующая порода, на продуктах выветривания которой формируется почвенный горизонт (ВМ).

Определение химических и физико-химических свойств почв проводилось по общепринятым методам [4].



Для исследования почв и подстилающих пород северо-западной части Восточного Саяна было заложено 2 катены: катена 1 на высоте 595–657 м, соответствующая склону северной экспозиции, и катена 2, соответствующая склону южной экспозиции (интервал высот – 595–690 м)

В соответствии с «Классификацией и диагностикой почв России» [3] исследуемые объекты относятся к отделу структурно-метаморфических почв. Окраска почвенного профиля слабо меняется с глубиной и представлена бурыми тонами. Горизонт АО в большинстве случаев имеет темно-бурый цвет и комковатую структуру, мощность данного горизонта варьирует от 5 до 10 см. Ниже залегает структурно-метаморфический горизонт, имеющий бурую либо светло-бурую окраску, иногда с охристым оттенком, мощность данного горизонта – от 10 до 20 см. В большинстве случаев в данном горизонте присутствует большое количество дресвы и щебня. У почв с маломощным профилем (менее 40 см) выделяется горизонт ВМС, также имеющий значительную щебнистость и хрящеватость. Мощность изученных почв в среднем не превышает 50–60 см.

Исследования почв, формирующихся на поверхности элювиальной фации катены 2 (южная экспозиция, точка 1) (см. рисунок), позволили установить формирование буроземов грубогумусированных. По содержанию гумуса эти почвы классифицируются как высокогумусные, его количество в верхнем горизонте составляет 13,0 %.

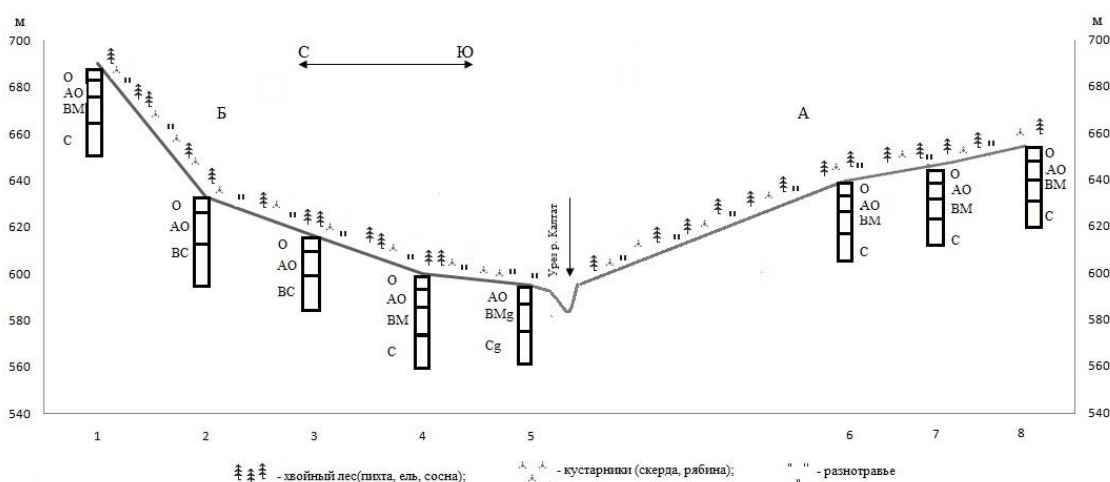


Рис. 1. Ландшафтно-геохимические сопряжения: А – катена 1; Б – катена 2.  
Почвы: 1 – буроземы грубогумусированные; 2 – буроземы грубогумусированные;  
3 – буроземы грубогумусированные, 4 – буроземы грубогумусированные;  
5 – буроземы грубогумусированные глееватые; 6 – буроземы грубогумусированные;  
7 – буроземы грубогумусированные; 8 – буроземы грубогумусированные

По величине рН водной вытяжки буроземы грубогумусированные характеризуются слабокислой реакцией, кислотность сначала увеличивается вниз по профилю от 5,8 до 4,91, затем снижается до 5,12. Незначительное содержание карбонатов в профиле обусловлено преобладанием в гумусе кислых фульватных кислот и промывным режимом, свойственными для темнохвойного пояса. Обменными ос-

нованиями данные почвы не насыщены, их содержание увеличивается вниз по профилю. Буроземы грубогумусированные характеризуются высоким содержанием окислов железа, при этом максимальное их количество наблюдается в нижней части профиля (1026,46 мг/кг), что также объясняется промывным режимом и средней кислотностью почв. По гранулометрическому составу данные почвы дифференцированы – сначала наблюдается утяжеление от супеси до легкого суглинка, а почвообразующая порода представлена песком связным.

Буроземы грубогумусированные, относящиеся к трансэлювиальной фации катены 1 (северная экспозиция, точка 7) (см. рисунок), по содержанию гумуса характеризуются как высокогумусные – до 15,09 % в горизонте АО. По величине pH водной вытяжки почвы характеризуются слабокислой реакцией среды (от 4,7 до 5,0), при этом сначала идет увеличение кислотности от горизонта АО к горизонту ВМ от 4,9 до 4,7, а затем от горизонта ВМ к горизонту С уменьшение до 5,0. Профили буроземов грубогумусированных характеризуются высоким содержанием  $Fe_2O_3$ , увеличивающимся вниз по профилю от 371,8 до 686,4 мг/100 г почвы в горизонте С. Распределение  $Al_2O_3$  в профилях почв также характеризуется нисходящей миграцией. По гранулометрическому составу профиль буроземов грубогумусированных дифференцирован, зафиксировано его утяжеление вниз к почвообразующей породе от супеси до среднего суглинка.

На основе анализа физико-химических свойств буроземов грубогумусированных глееватых, развивающихся на поверхности супераквальной фации катены 2 (южная экспозиция, точка 5) (см. рис. 1), установлено максимальное количество общего углерода в горизонте АО – 24,1 %. По величине pH водной вытяжки буроземы грубогумусированные глееватые характеризуются слабокислой реакцией среды. Вниз по профилю происходит снижение кислотности от 5,83 до 6,46. По содержанию гранулометрических фракций данные почвы дифференцированы, верхний горизонт – супесчаный, нижний – среднесуглинистый. Количество окислов железа увеличивается вниз по профилю к почвообразующей породе до 1036,55 мг/кг. Содержание окислов алюминия незначительно.

Таким образом, проведенные исследования показали, что основные типы почв, формирующиеся на элювиальных, трансэлювиальных и трансэлювиально-аккумулятивных фациях – буроземы грубогумусированные, а на супераквальных фациях – буроземы грубогумусированные глееватые. Это объясняется типом растительности, под пологом которой формируются данные типы почв, климатическими особенностями данной территории и хорошим дренажем автономных позиций. При этом для большинства почв характерна общая направленность элементарных почвенных процессов – подстилкообразование, гумусообразование, иллювиально-железистый и иллювиально-гумусовый процессы, оглеение. Все почвы высокогумусные, при этом большая часть гумуса сосредоточена в верхнем подстильно-торфяном горизонте. Содержание подвижных форм железа и алюминия во всех исследованных почвах высокое и характеризуется нисходящей миграцией, что обусловлено особенностями промывного водного режима.

Работа проводилась при поддержке гранта «Биосферный потенциал и экономическая роль долговременной углеродопоглощающей способности таежных

экосистем Восточной Сибири (на примере заповедника «Столбы»)) в рамках задания Минобрнауки России в 2013 году.

#### Список литературы

1. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М., 1988. 328 с.
2. Розанов Б. Г. Морфология почв. М., 2004. 432 с.
3. Классификация и диагностика почв России / под ред. Г. В. Добровольского. Смоленск, 2004. 224 с.
4. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М., 1970. 488 с.

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 595.772

### ФАУНА СЛЕПНЕЙ (DIPTERA, TABANIDAE) ЗЕЙСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Е.А. Чернявский

Научный руководитель канд. биол. наук Е.В. Борисова

*Сибирский федеральный университет*

Флористическое разнообразие и высотная поясность на территории Зейского заповедника позволяет сосуществовать как представителям тундровой, бореальной, так и степной фауны слепней. Данный район находится на пересечении нескольких фаунистических комплексов, что делает его интересным с точки зрения изучения проникновения видов в новые районы в связи с изменением климатических условий. В целом по Амурской области в исследовательской работе Н. Г. Олсуфьева указано 37 видов и подвидов слепней, относящихся к 5 родам: *Chrysops* Mg. (7 видов), *Tabanus* L. (4), *Atylotus* O.S. (2), *Hybomitra* End. (20), *Haematopota* Mg. (4). Согласно материалам исследования группы учёных под руководством С. А. Сербенюка, на территории Зейского заповедника можно встретить значительную часть от фауны области, а именно 29 видов и подвидов слепней, относящихся к 5 родам: *Chrysops* Mg. (6 видов), *Tabanus* L. (2), *Atylotus* O.S. (2), *Hybomitra* End. (17), *Haematopota* Mg. (2). Настоящая работа является продолжением изучения видового состава сем. Tabanidae (Diptera) на территории государственного природного заповедника “Зейский”.

Зейский заповедник расположен на северо-востоке Амурской области, на восточной оконечности хребта Тукурингра, где горную систему Тукурингра – Соктахан – Джагды прорезает узкая долина реки Зея. Хребет Тукурингра протягивается с северо-запада на юго-восток примерно на 300 км. Севернее расположена Верхнезейская впадина, отделяющая Тукурингру от Станового хребта, имеющего также широтное простирание. Южнее Тукурингры находится Амуро-Зейское плато. Высоты хребта колеблются от 400 до 1500 м над уровнем моря, чаще всего около отметки 600 м. Максимальная высота в истоках р. Мотовой – 1443 м. Для хребта Тукурингра характерны крутые склоны и плоские, почти выровненные водоразделы, поднятые над днищами речных долин на 400–600 м. Климат в исследуемом районе континентальный с муссонными чертами. Весна сухая, ветреная, прохладная. В мае к началу вегетации осадков выпадает мало, отмечается весенний минимум влажности воздуха. Лето обычно теплое, влажное, что объясняется влиянием воздушных масс юго-восточных муссонов. Среднемесячная температура в июле – 18,2 градуса выше нуля. В течение года выпадает 530–600 мм осадков, причем значительная часть их (70–80 %) – именно в летний период. Количество осадков летом преобладает над испарением, что приводит к переувлажнению почвы. Безморозный период длится 75–86 дней, вегетационный – 130–140 дней. Общее количество часов солнечного сияния 2000–2500, из них на вегетационный период (май–сентябрь) приходится примерно половина. Граница заповедника проходит по крупнейшему правому притоку реки Зея – реке Гиллой. Истоки всех малых рек находятся в среднем и верхнем горных поясах, для них характерно каменистое русло и стремительное течение. Многие из малых рек промерзают до дна. Температура воды в них – 4–6 градуса выше нуля. Степень заболоченности территории невелика. В долинах горных рек встречаются заболоченные лиственничные (реже еловые) редколесья («мари»), очень редки настоящие болота, главным образом мезотрофные.

### **Район проведения исследований**

Кордон «Тёплый» – площадка располагается недалеко от места впадения ручья Тёплый в Зейское водохранилище. Древесная растительность представлена лиственничными лесами с примесью белой берёзы. Также встречается растительность маньчжурского типа – дуб монгольский, чёрная берёза. Кордон «52» – площадка располагается на 52 километре Золотогорской трассы в прилегающем лесу, находясь на берегу реки Большая Эракингра. Лесообразующая порода – лиственница даурская и берёза белая. По глубоким распадкам и тенивым участкам присутствует ель. Сильно развито мелколесье – подрост лиственницы и берёзы, ольха, рододендрон. Кордон «Чимчан» – площадка располагается на месте впадения р. Нижний Чимчан в р. Гиллой. С суши кордон со всех сторон окружает заболоченное лиственничное редколесье («марь»). Кордон «Гольцы» – площадка располагается на высоте около 1300 метров над уровне моря, недалеко от наивысшей точки заповедника у истока реки Мотовая. Это подгольцовая зона, являющаяся типичной высокогорной тундрой. Растительность угнетённая, обычны стелющиеся и карликовые формы. Покрыта низкорослыми формами голубики, шикши, брусники, изредка багульника болотного, карликовой берёзы, ивы и ольхи, с выходами скальных пород. Имеются обширные заросли кедрового стланника.

## Материалы и методы

Насекомых собирали летом 2012 (с 28.05.2012 по 16.07.2012) года на вышеперечисленных кордонах на территории Зейского заповедника. Сборы проводились по стандартным методикам: лов «с себя» проводили на протяжении 22 суток по 15 минут в день в часы наибольшей активности слепней (с 9 утра до 9 вечера); также в обозначенный период проводили сборы слепней с окон в помещениях и при помощи ловушки Малеза. Всего собрано 338 экземпляров слепней, преимущественно самок. Материал определялся автором при использовании руководства Н.Г. Олсуфьева [1977] и Н.А. Виоловича [1968], а также по соответствующему разделу в определителе насекомых Дальнего Востока России [Определитель насекомых Дальнего Востока, 2001]. Названия таксонов и видов приводятся по определителю насекомых Дальнего Востока России, с учётом заново “открытых” видов. Виды перечислены в алфавитном порядке. Типология ареалов приводится согласно предложенной Олсуфьевым Н.Г. [1977], в которой группы видов со схожими ареалами сведены в фаунистические комплексы, обнаруживающие свою приуроченность к известным ландшафтным зонам. В систематическом обзоре видов римскими цифрами обозначены типы фаун слепней. Цифрой (I) обозначены виды борево-азиатского субрегионального типа фауны; II — к афроазиатскому аридному субрегиональному типу фауны. Виды, помеченные звёздочкой ( \* ), впервые отмечены в Зейском заповеднике.

## Систематический обзор видов

Род *Haematopota* Meigen, 1803.

1. *H. desertorum* Szilady, 1923 – восточносибирский лесной вид (II), кордон «52», в берёзово-лиственничном лесу. 2. \**H. stackelbergi* Olsufjev, 1967 – дальневосточный лесной вид (I), кордон «52» и «Чимчан», в берёзово-лиственничном лесу, на марях. 3. *H. tamerlani* Szilady, 1923 – восточносибирский лесной вид (I), кордон «Тёплый», «52» и «Чимчан», в берёзово-лиственничных лесах, на лугах.

Род *Hybomitra* Enderlein, 1922.

4. *H. (s. str.) aequetincta* (Becker, 1900) – голарктический тундровый вид (I), кордон «Тёплый» и «52», на марях, в лиственничных лесах. 5. *H. (s. str.) arpadi* (Szilady, 1923) – голарктический таежный вид (I), кордон «Тёплый» и «52», в лесах, на марях и на лугах. 6. *H. (s. str.) astur* Erichson, 1851 – восточносибирский лесной вид (I), кордон «Тёплый», «52» и «Гольцы», в лесах, на марях и на лугах. 7. *H. (s. str.) bimaculata* var. *bisignata* Jaennicke, 1866 – таежно-лесной вид (I), кордон «52», в берёзово-лиственничных и пойменных лесах, на марях и на лугах. 8. *H. (s. str.) brevis* Loew, 1858 – восточносибирский лесной вид (I), кордон «Тёплый» и «52», в берёзово-лиственничных лесах, на пойменных лугах. 9. *H. (s. str.) distinguenda contigua* Olsufjev, 1972 – восточносибирский лесной подвид (I), кордон «Тёплый», «52» и «Чимчан», в берёзово-лиственничных лесах, на лугах. 10. *H. (s. str.) lundbecki sibiricus* Olsufjev, 1972 – восточносибирский таежный подвид (I), кордон «Тёплый», «52» и «Чимчан», в лесах, на марях и на лугах. 11. *H. (s. str.) lurida* (Fallen, 1817) – голарктический таёжно-лесной вид (I), кордон «Тёплый», в лесах, на марях и на лугах. 12. *H. (s. str.) montana morgani* Surcouf, 1912 – южный

степной подвид (II), кордон «52», в лесах, на марях и на лугах. 13. *H. (s. str.) nigricornis* Zetterstedt, 1842 – таёжный вид (I), кордон «Тёплый» и «52», в лесах, на марях и на лугах. 14. *H. (s. str.) nitidifrons nitidifrons* (Szilady, 1914) – восточносибирский таёжно-лесной подвид (I), кордон «52» и «Гольцы», в берёзово-лиственничных лесах, на марях и на пойменных лугах. 15. *H. (s. str.) pavlovskii* Olsufjev, 1936 – восточносибирский таёжно-лесной вид (I), кордон «52», в берёзово-лиственничных лесах. 16. *H. (s. str.) sexfasciata* (Hine, 1923) – голарктический тундрово-таёжный вид (I), кордон «Тёплый», «52» и «Чимчан», в берёзово-лиственничных лесах, на марях. 17. \**H. (s. str.) stigmoptera* Olsufjev, 1937 – дальневосточный лесной вид (I), кордон «Тёплый», в берёзово-лиственничных лесах. 18. *H. (s. str.) tarandina* Linnaeus, 1758 – таёжный вид (I), кордон «52», в берёзово-лиственничных лесах, на марях.

### Род *Tabanus* Linne, 1758.

19. *T. geminus* Szilady, 1923 – восточносибирский лесной вид (I), кордон «52» берёзово-лиственничные леса. 20. *T. pleskei* Krober, 1925 – восточносибирский лесной вид (I), кордон «Тёплый» и «52», берёзово-лиственничные леса, пойменные луга.

### Результаты и обсуждение

На территории государственного природного заповедника «Зейский» отмечено 20 видов и подвидов слепней, относящихся к 3 родам (р. *Tabanus* – 2, р. *Hybomitra* – 15, р. *Haematopota* – 3). Из них 2 вида приводятся впервые для Зейского заповедника. В обоих случаях это нетипичные для данной местности виды, границы ареалов которых проходят значительно южнее (на 240 и на 600 км для *Haematopota stackelbergi* и *Hybomitra stigmoptera* от заповедника соответственно). Наиболее северным местонахождением вида *Haematopota stackelbergi* ранее было Корсаково, к югу от Кумара, в 150 км к северу от Благовещенска. Примечательно, что в исследовании данного района за 1981 (то есть 4 года спустя) данный вид также не указывается. Другой вид, *Hybomitra stigmoptera*, найден в количестве двух экземпляров. Ранее наиболее северным местонахождением являлась ст. Кундур, в 160 км к западу от Биробиджана. Структура табанидофауны данной местности имеет преимущественно бореальный облик, т. к. 90 % видов относятся к борево-евразийскому субрегиональному типу фауны. В нём преобладают представители восточносибирского лесного комплекса (45 % от всех найденных видов), а именно: *Tabanus geminus*, *T. pleskei*, *Hybomitra brevis*, *Hyb. astur*, *Hyb. distinguenda contigua*, *Hyb. pavlovskii*, *Hyb. stackelbergi*, *Hyb. stigmoptera*, *Haematopota tamerlani*. Восточносибирский таёжный комплекс (35 %) представлен *Hybomitra tarandina*, *Hyb. arpadi*, *Hyb. bimaculata* var. *bisignata*, *Hyb. lurida*, *Hyb. nitidifrons nitidifrons*, *Hyb. lundbecki sibiriensis* и *Hyb. nigricornis*. Тундровый комплекс (10 %) представлен *Hybomitra aequincta* и *Hyb. sexfasciata*. Незначительная доля в фауне принадлежит представителям афроевразийского аридного типа – 10%, представленного лишь степным комплексом в количестве 2 видов *Hybomitra montana morgani* и *Haematopota disertorum*. В предыдущем исследовании фауна была представлена в

основном восточносибирским таёжным комплексом (45 % от всех найденных видов), а также восточносибирским лесным (34 %). Обнаруживают своё присутствие также степной (10%), тундровый (7 %) и восточноазиатский (4 %) комплексы.

По степени обилия видов, или индексу доминирования (ИД) для табанидокомплекса выделяют 4 группы: доминирующие или массовые виды, составляющие 8,0 % и более от общей численности, субдоминирующие или многочисленные – от 2,0 до 8,0 %, малочисленные – от 0,5 до 2,0 % и редкие – менее 0,5 %. Доминирующими видами оказались *Hybomitra astur* (30,8 %), *Hyb. distinguenda contigua* (24 %), *Hyb. lundbecki sibiriensis* (22,5 %); субдоминирующие виды *Hybomitra arpadi* (3,6 %), *Hyb. nigricornis* (2,7 %), *Haematopota tamerlani* (2,7 %); малочисленные виды: *Hybomitra aequetincta* (1,8 %), *Hyb. montana morgani* (1,8 %), *Hyb. sexfasciata* (1,8 %), *Haematopota stackelbergi* (1,8 %), *Hybomitra pavlovskii* (1,5 %), *Hyb. brevis* (0,9 %), *Tabanus geminus* (0,9 %), *Hybomitra bimaculata var. bisignata* (0,6 %), *Hyb. nitidifrons nitidifrons* (0,6 %), *Hyb. stigmoptera* (0,6 %), *Hyb. tarandina* (0,6 %), *Tabanus pleskei* (0,6 %); редко встречающимся видами можно назвать *Haematopota disertorum* (0,3 %), и *Hybomitra lurida* (0,3 %). Таким образом, на доминирующие и субдоминирующие виды в совокупности приходится 86,3 % экземпляров от всего материала. Большая часть совокупности субдоминирующих и доминирующих видов представлена видами восточносибирского лесного комплекса (66,7 % от материала совокупности), остальные являются представителями восточносибирского таёжного (33,7 %). Малочисленные и редкие виды (13,7 % от всего материала) в материале представлены восточносибирским лесным (44,7 % от материала совокупности малочисленных и редких), восточносибирским таёжным (14,9 %), степным (13,8 %) и тундровым (12,8 %) комплексами. В исследовании 1981 года доминирующие и субдоминирующие виды в совокупности составляют 93,8 % от всего материала и представлены восточносибирским таёжным (51,6 % материала от совокупности), степным (41,9 %), тундровым (4,2 %) и восточносибирским лесным (2,3 %) комплексами. Малочисленные и редкие в совокупности в прошлом составили лишь 6,2 % от всего материала. Среди них представлены восточносибирский лесной комплекс (84,2 % от материала совокупности), восточносибирский таёжный (14,3 %), тундровый (0,8 %), степной (0,6 %) и восточноазиатский (0,04 %).

### Выводы

В результате проведённой работы удалось обнаружить два ранее не отмечавшихся в заповеднике вида слепней *Haematopota stackelbergi* и *Hybomitra stigmoptera*. На основе сравнения с предыдущими исследованиями можно заключить, что расширение их ареалов произошло именно за последние 30 лет. По сравнению с прошлыми исследованиями представленность фаунистических комплексов не претерпела серьёзных изменений. В то же время видовое обилие за прошедший период сильно изменилось. Доминирование лесного комплекса резко возросло, в то время как тундровый и степной стали малочисленны. Можно предположить, что повышение среднемесячных температур в заповеднике стало причиной снижения численности тундровых видов. Одновременно за прошедшие 30 лет функционирования Зейского водохранилища относительная влажность в прилегающем районе ожидаемо повысилась, что может быть причиной угнетения степного комплекса слепней.

**ДОННЫЕ БЕСПОЗВОНОЧНЫЕ ОЙСКОГО, КАРОВОГО,  
РАДУЖНОГО ОЗЕР ГОРНОГО ХРЕБТА ЕРГАКИ  
(ЗАПАДНЫЙ САЯН)**

**Н.В. Михайлова**

**Научный руководитель канд. биол. наук С.П. Шулепина**

*Сибирский федеральный университет*

Проблеме сохранения и мониторинга биоразнообразия уделяется в мире все большее внимание. Она является одной из глобальных экологических проблем и приобретает значение по мере исчезновения новых видов на Земле. Уменьшение биоразнообразия приобрело катастрофический характер, что связано в первую очередь с разрушением среды обитания в результате все усиливающейся антропогенной деятельности. Важную роль играет мониторинг биоразнообразия горных, в том числе водных экосистем, находящихся пока вне большой антропогенной нагрузки, так как он дает ценный фактический (фаунистический и зоогеографический) и сравнительный материал.

Многочисленные озера горного хребта Ергаки, расположенного в центральной части Западного Саяна (юг Красноярского края), практически не изучены в гидробиологическом отношении. Между тем, антропогенная нагрузка в виде рекреационной на эти озера будет возрастать, так как этот район становится популярным и удобным для туризма и кемпингового отдыха, интенсифицируется строительство турбаз у подножия хребта вдоль трассы М54 (Красноярск – Кызыл), по берегам речек и ручьев. С целью охраны, поддержания экологического баланса, упорядочения рекреационно-туристической нагрузки на уникальные природные объекты в 2005 г. создан природный парк «Ергаки» – государственное учреждение краевого значения в ведении администрации Красноярского края. Очевидно, что в таких условиях необходимы фоновые гидробиологические сведения о состоянии водных экосистем ергакских озер, а также сравнительный анализ экологического состояния озёр с различающейся антропогенной нагрузкой.

В Западном Саяне озера преимущественно ледникового происхождения: каровые, моренно-подпрудные или рожденные горными обвалами. В числе наиболее крупных озер – Ойское в истоках Ои. На территории парка Ергаки находятся более 20 озер горного типа, многие имеют высокое рыбопромысловое значение. Озеро Ойское расположено на южном склоне хребта Кулумыс. Озеро представляет собой замкнутую чашу, из которой вытекает река Оя, правобережный приток Енисея. Оно находится близ тракта М54 в хозяйственной зоне природного парка Ергаки: на берегу располагается база Танзыбейского ДРСУ, выше на впадающем в озеро ручье – база отдыха Ергаки. Другие два озера находятся в рекреационно-туристической зоне парка в отрогах горного массива «Спящий Саян» хребта Ергаки и являются истоками соответственно Нижней Буйбы и Малой Буйбы, которые,



сливаясь, образуют Нижнюю Буйбу, приток р. Ус. Из этих озер самое высокогорное (1631 м), находящееся на границе леса и горной тундры, безрыбное Каровое. Ниже на 178 м, в редколесье (кедр, пихта), расположено населенное хариусом Радужное. Самым низкорасположенным (1416 м) исследованным озером является Ойское, также заселенное рыбой, окруженное лесом, редколесьем, лугами, болотами.

Проведены исследования сообществ зообентоса озер: Ойское, Каровое, Радужное природного парка Ергаки в июле 2013 года. Отбор и первичную обработку проб зообентоса проводили стандартными гидробиологическими методами. Помимо отбора проб зообентоса измеряли температуру воды (термометром Long-Stem Thermometer, F/C, 8, Cole-Parmer) и содержание кислорода (кислородомером Мо-128, Mettler Toledo, Швейцария), pH (портативным pH-метром «pHep2», Hanm Instruments, США), прозрачность (S) измеряли диском Секки.

За данный период исследования зообентоса, максимальное значение температуры (18,5 °C) было зарегистрировано в июле на станции № 5 оз. Ойское, минимальное значение температуры (12,1 °C) было отмечено на станции № 2 оз. Каровое.

Данные pH в озерах природного парка Ергаки варьировали в пределах 6,9–7,36, что соответствовало нейтральной среде. Содержание O<sub>2</sub> в озерах Каровое, Радужное, Ойское составляло в пределах 9,72–11,32 (мг/л), что соответствовало нормам рыбохозяйственных водоемов.

Грунты оз. Ойское представлены преимущественно илами, крупными заиленными валунами. Грунт оз. Каровое представлен илом, а оз. Радужное – ил с детритом.

За исследованный период зарегистрирован 21 вид донных животных, в том числе отряды: двукрылые – 14 таксонов, ручейники – 3, олигохеты – 3 таксона, двусторчатые моллюски – один таксон.

Зарегистрировано сходство видового состава донных сообществ между озерами Радужное и Каровое ( $K_{sc} = 0,6$ ), зообентос озера Ойское имел малое сходство с таковым Карового и Радужного ( $K_{sc} = 0,18 - 0,22$ ). Аналогичная ситуация отмечена в 2009 г.

Наибольшее видовое разнообразие зообентоса зарегистрировано в озере Ойское (12) видов, где преобладали хирономиды. Наименьшее видовое разнообразие донных беспозвоночных отмечалось в озере Каровое (7) видов, где также отмечалось преобладание личинок хирономид (рис. 1).

Во всех озерах природного парка Ергаки чаще других встречались личинки хирономид *Tanytarsus pseudolestagei* Goetghebuer, олигохеты *Pelosclex ferox* Eisen. Только в озере Ойском были обнаружены личинки ручейников *Goera sp.* Stephens, *Mystacides bifidus* Martynov, олигохеты *Lumbriculus variegatus* O.F.Muller, личинки хирономид *Prodiamesa olivacea*, Meigen. Личинки хирономид *Ablabesmia gr. annulata* Meigen зарегистрированы только в озере Каровое. В озере Радужном наблюдали личинки хирономид *Procladius ferrugineus* Kieffer, *Thienemannimyia sp.*, ручейник *Agrypnia obsoleta* Hagen.

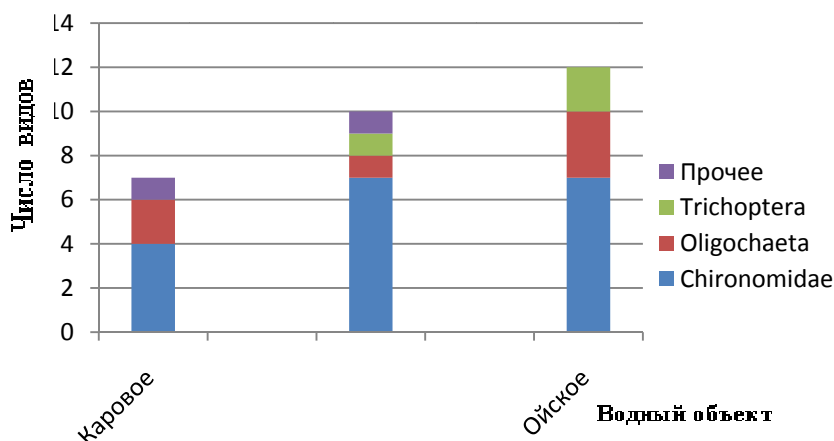


Рис. 1. Видовой состав зообентоса озер: Каровое, Радужное, Ойское, июль 2013 г.

Максимальная плотность зообентоса зарегистрирована в озере Ойское ( $0,93 \pm 0,41$  экз/м<sup>2</sup>), минимальная – в озере Каровое ( $0,77 \pm 0,41$  экз/м<sup>2</sup>). Наибольшая биомасса отмечена в оз. Каровое ( $3,25 \pm 2,93$  г/м<sup>2</sup>), минимальная – в оз. Радужное ( $0,47 \pm 0,32$  г/м<sup>2</sup>) (таблица).

**Таблица.** Значение численности (N, экз/м<sup>2</sup>) и биомассы (B, г/м<sup>2</sup>) зообентоса озер Каровое, Радужное, Ойское, июль 2013 г.

Озеро	Станции	N (экз./м <sup>2</sup> )	B (г/м <sup>2</sup> )
Каровое	1	0,24	0,09
	2	0,80	0,64
	3	0,12	0,24
	4	1,92	12,04
	среднее	$0,77 \pm 0,41$	$3,25 \pm 2,93$
Радужное	1	0,15	0,09
	2	0,24	0,04
	3	1,03	0,35
	4	1,72	1,40
	среднее	$0,80 \pm 0,40$	$0,47 \pm 0,32$
Ойское	1	$2,06 \pm 0,54$	$3,83 \pm 2,20$
	2	$0,98 \pm 0,02$	$2,48 \pm 0,24$
	3	$0,46 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,02$
	5	$0,21 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,11$
	среднее	$0,93 \pm 0,41$	$1,75 \pm 0,86$

В озере Ойском доминировали по численности хирономиды (64 % от общей численности), с преобладанием *Tanytarsus pseudolestagei*. По биомассе преобладали олигохеты (54 % от общей биомассы), среди которых в массе развился *Peeloscolex ferox*. В озере Каровом по численности доминировали личинки хирономид (42 % от общей численности), с преобладанием *Stictochironomus crassiforceps* Kieffer, по биомассе преобладали двустворчатые моллюски *Pisidium sp.* (78 % от

общей биомассы). В озере Радужном основной вклад в плотность донного сообщества вносили хирономиды (86–49 % от общей численности и биомассы), из которых доминировал *Dicrotendipes nervosus* Staeger (рис. 2, 3).

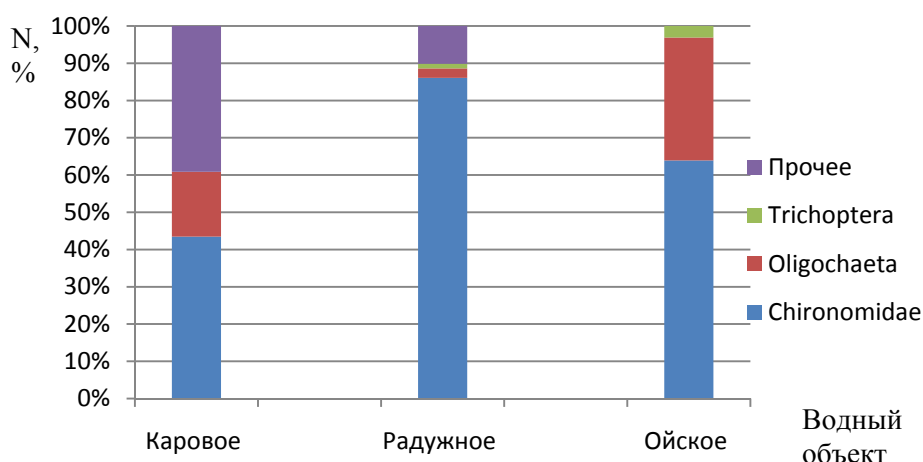


Рис. 2. Динамика численности (N, %) групп зообентоса озер: Каровое, Радужное, Ойское, июль 2013 г.

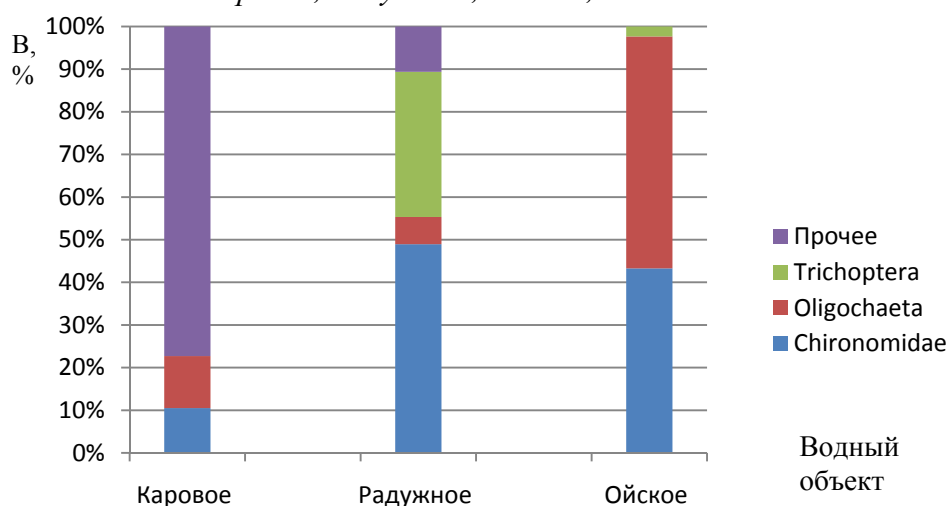


Рис. 3. Динамика биомассы (B, %) групп зообентоса озер: Каровое, Радужное, Ойское, июль 2013 г.

Трофический статус озер природного парка Ергаки оценен по биомассе зообентоса в соответствии с классификацией С. П. Китаева. В оз. Радужное трофность соответствовала очень низкому классу ( $\alpha$  – олиготрофный). Трофический статус оз. Ойское оценен на уровне низкого класса ( $\beta$  – олиготрофный). В оз. Каровое трофность соответствовала умеренному классу ( $\alpha$  – мезотрофный).

В межгодовой динамике отмечено снижение уровня кормности озера Радужного в 2013 г. по сравнению с 2009 г. (низкий класс,  $\beta$  – олиготрофный). Трофический статус оз. Ойское и оз. Каровое в 2013 г. соответствовал таковому в 2009 г. Это указывает на стабильные условия для существования гидробионтов в исследованных озерах.

**ПИТАНИЕ РОТАНА-ГОЛОВЕШКИ *PERCCOTTUS GLENII*  
DYBOWSKI, 1877 В ПРУДУ БУГАЧ (БАССЕЙН СРЕДНЕГО ЕНИСЕЯ)**

**Н.О. Яблоков, Ю.Ю. Яковлев**

**Научный руководитель канд. биол. наук И.В. Зуев**

*Сибирский федеральный университет*

В течение XX века на территории Евразии широко распространилась пресноводная рыба дальневосточной ихтиофауны – ротан-головешка *Perccottus glenii* Dybowski, 1877 (сем. Odontobutidae). Его современный ареал простирается в меридиональном направлении от водоемов Восточной Европы до бассейна Амура. В последние десятилетия ротан активно расселяется на территории сибирских водоемов – в бассейнах Оби, Лены и оз. Байкал [1, 9, 10, 11]. В 2012 году данный вид был впервые обнаружен в одном из притоков пруда Бугач – искусственного эвтрофного водоема, принадлежащего к бассейну среднего Енисея [4].

Проникновение ротана в водоем зачастую является причиной негативных изменений, прежде всего, сокращения численности различных групп гидробионтов (беспозвоночных, амфибий, а также молоди рыб, в том числе и промысловых). В связи с этим вопросам распространения и питания ротана уделяется большое внимание. Трофические связи ротана в водоемах Дальнего Востока и Европейской части России достаточно хорошо изучены [3, 6, 7]. Изучение аспектов питания данного вида для водоема бассейна Енисея проводилось впервые.

Целью данной работы был анализ компонентного состава пищи ротана пруда Бугач, а также выявление изменений в характере питания в процессе роста рыбы.

В работе использован ихтиологический материал, собранный в июле–августе 2013 г. в месте впадения р. Каракуша в пруд Бугач (56° 04.147' с.ш., 92° 44.163' в.д.), на глубине 0,5–1,0 м. В качестве орудий лова использовались гидробиологический сачок из крупного мельничного газа и мальковый невод. Всего было отловлено 63 особи ротана. После отлова рыба фиксировалась в 4 %-ном формальдегиде. Обработка проб производилась в лабораторных условиях, по общепринятым методикам [8]. У отловленных экземпляров измерялась абсолютная длина (L) с точностью до 0,1 см и масса (W) до 0,01 г. Возраст рыб определялся по чешуе и отолидам. Помимо этого измерялась общая масса пищевого комка, а также масса его отдельных компонентов, высчитывался индекс накормленности (‰). При расчете среднего значения индекса наполнения учитывались только наполненные желудки. Значения групп пищевых компонентов в питании ротана оценивались в процентах по массе и частоте встречаемости. Состав пищевого комка устанавливался под бинокулярным микроскопом МБС-10. Животные компоненты определялись до семейств или отрядов по определителю Кутиковой [5].

Ротан в пробе был представлен тремя возрастными группами: ювенальными особями возрастов 0+, 1+ и половозрелыми возраста 2+. Основу пробы составляли сеголетки длиной 1,6–3,3. Линейные размеры тела рыб варьировали от 1,6 до 9,5 см, массы от 0,07 до 13 г, при средней длине  $3,07 \pm 1,74$  см и массе  $1,22 \pm 3,32$  г. Значения размерно-возрастных характеристик для каждой группы приведены в табл. 1.

Полностью или частично заполненные желудочно-кишечные тракты были отмечены у 83 % особей. Среднее значение общего индекса наполнения (ИН) желудочно-кишечного тракта для выборки составило  $223,55 \pm 128,55$  ‰ (максимальное –  $514,71$  ‰, минимальное –  $25$  ‰). Наибольшее значение среднего индекса наполнения (СИН), рассчитанного по группам, было характерно для рыб возраста 2+ ( $324,52 \pm 115,4$  ‰). Для рыб возрастов 0+ и 1+ значения СИН составили  $242,08 \pm 157,8$  и  $163,73 \pm 59,02$  соответственно. Индексы наполнения кишечных трактов для рыб 1+ и 2+ достоверно различались по *t*-критерию Стьюдента, при  $p = 0,05$  (см. табл. 2).

**Таблица 1.** Линейные размеры и масса тела ротана из пруда Бугач

Возраст, лет	0+	1+	2+
Абсолютная длина тела L, см	$2,35 \pm 0,42$	$3,48 \pm 0,35$	$8,58 \pm 0,9$
	1,6–3,3	2,8–4,3	7,4–9,5
Масса Q, г	$0,21 \pm 0,09$	$0,66 \pm 0,29$	$12,02 \pm 3,79$
	0,07–0,5	0,36–1,5	6,10–13,0
Кол-во экземпляров	46	13	5

Примечание: над чертой – среднее значение  $\pm$  стандартная ошибка, под чертой – предельные значения показателя.

В желудочно-кишечных трактах ротана было обнаружено 14 компонентов животного происхождения, а также фрагменты водорослей и высшей водной растительности. У особей возраста 0+ обнаружено 8 компонентов, у особей возрастных групп 1+ и 2+ – 9 и 6 компонентов соответственно. При этом с увеличением длины тела происходят значительные изменения в спектре питания. Во всех трех представленных группах были отмечены лишь представители *Chironomidae*, по частоте встречаемости данная таксономическая группа преобладала в пищевом комке сеголеток (70,27 %) и годовиков (58,33 %). Для двухлетних особей процент встречаемости был гораздо ниже и составил всего 20 %. Кроме этого в питании сеголеток в значительном количестве обнаружены представители *Cladocera* (55,26 %), *Copepoda* (28,95 %) и *Ephemeroptera* (21,62 %). Высокой на данном этапе развития оказалась и частота встречаемости растительных остатков (21,62 %). Также единично отмечались представители *Chaoboridae*, *Plecoptera*, *Mollusca*. У двухлетних особей в питании часто встречались представители *Ephemeroptera* (25 %) и растительные остатки (16,67 %). Существенно увеличился процент встречаемости *Chaoboridae* (16,67 %) и *Plecoptera* (25 %). Начинают встречаться представители семейств *Odonata* и *Hydracarinae*. Процент встречаемости веслоногих и ветвистых ракообразных сводится к минимуму и не превышает 0,1 %. На третьем году

жизни по частоте встречаемости начинает преобладать молодь рыб (преимущественно карася, а также собственные сеголетки ротана) – 60 %. Частыми компонентами становятся представители *Amphipoda* и *Hemiptera* (40 %), появляются имаго и личинки *Coleoptera* и молодь *Decapoda* – по 20 % соответственно. Следует отметить, что отряд *Decapoda* в пищевом комке ротана был представлен узкопалым речным раком *Astacus leptodactylus* Eschscholtz, 1823, в настоящее время также ведущим активную экспансию в водоемы бассейна Енисея [2].

Анализ питания ротана по массовой доле компонентов в пищевом комке также показал значительные различия между рассматриваемыми размерно-возрастными группами. Так у сеголеток более половины от массы комка составляют *Chironomidae*. Значительна роль *Ephemeroptera* (14,73 %), доля *Plecoptera* и растительных остатков в два раза ниже и составляет порядка 7 %. На втором году жизни доля *Chironomidae*, по-прежнему, преобладает, значительно возрастает роль *Chaoboridae* (21,67 %), *Ephemeroptera* (20,59 %) и *Plecoptera* (20,04 %). Появляются личинки *Odonata* (11,27 %). В пищевом комке половозрелых особей, по массе более 50 % составляет молодь рыб, велика доля *Amphipoda* (11,18 %) и *Decapoda* (23,03 %). Значительно ниже роль водяных насекомых отрядов *Hemiptera* (6,58 %) и *Coleoptera* (2,63 %). Массовая доля *Chironomidae* была минимальной и составила около 1,32 %.

Исходя из полученных данных ротан в исследованном водоеме характеризуется широким спектром питания. Компонентный состав пищевого комка ротана формируют как растительные, так и животные компоненты. Тем не менее, как по частоте встречаемости, так и по массовой доле основу составляет животная пища. Для особей-сеголеток и годовиков это преимущественно личинки и имаго насекомых (прежде всего, *Diptera* и *Ephemeroptera*, а также представители *Cladocera* и *Copepoda*). С возрастом доля планктонных ракообразных в питании снижается и перестает быть существенной. Начиная с трехлетнего возраста, ротан переходит на активное потребление молоди рыб и более крупных ракообразных (*Amphipoda* и *Decapoda*).

**Таблица 2.** Частота встречаемости и массовые доли организмов в пищевых комках ротана из пруда Бугач

Компоненты	Возраст					
	0+		1+		2+	
	% встреч.	% по массе	% встреч.	% по массе	% встреч.	% по массе
Молодь рыб	–	–	–	–	60	55,26
<i>Decapoda</i>	–	–	–	–	20	23,03
<i>Amphipoda</i>	–	–	–	–	40	11,18
<i>Coleoptera</i>	–	–	–	–	20	2,63
<i>Hemiptera</i>	–	–	–	–	40	6,58
<i>Chironomidae</i>	70,27	63,86	58,33	22,21	20	1,32
<i>Chaoboridae</i>	2,7	0,87	16,67	21,67	–	–

<i>Hydracarinae</i>	–	–	8,33	0,87	–	–
<i>Odonata</i>	–	–	11,27	11,27	–	–
<i>Ephemeroptera</i>	21,62	14,73	25	20,59	–	–
<i>Plecoptera</i>	5,41	7,8	25	20,04	–	–
<i>Mollusca</i>	5,41	0,61	8,33	1,08	–	–
<i>Cladocera</i>	55,26	3,25	0,08	0,11	–	–
<i>Copepoda</i>	28,95	1,4	–	–	–	–
Растительные компоненты	21,62	7,49	16,67	2,17	–	–
Кол-во иссл. желудков, экз.	46		13		5	
Кол-во пустых желудков, экз.	9		1		1	
Индекс наполнения, ‰	242,08 ± 157,8		163,73 ± 59,02		324,52 ± 115,4	

Значения индексов наполнения значительно превосходят таковые для ряда водоемов естественного, а также некоторых водоемов инвазивного ареалов, что говорит о хорошей обеспеченности кормом [2, 4, 6].

Учитывая факт появления самовоспроизводящейся популяции ротана в пределах искусственной системы водоемов на р. Бугач при обилии кормовых ресурсов, в условиях отсутствия прессинга со стороны хищников, в ближайшее время можно ожидать расселение ротана в пригороде города Красноярск.

### Список литературы

1. Андреев Р. С., Матвеев А. Н., Самусенок В. П., Юрьев А. Л., Юрьев И. И., Вокин А. И., Родченко О. П. Первая находка ротана-головешки (*Percottus glenii* Dybowski, 1877) в бассейне верхнего течения реки Лены // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2011. № 4 (4). С. 143–145.
2. Гадинов А. Н. Распределение рака речного в водоемах енисейского рыбохозяйственного района // Современные проблемы и перспективы рыбохозяйственного комплекса: Мат-лы Второй науч.-практ. конф. молодых ученых, ФГУП «ВНИРО». М.: Изд-во ВНИРО, 2011. С. 158–161.
3. Горлачёва Е. П. Питание ротана *Percottus glenii* Dybowski в Верхнеамурском бассейне // Пресноводные экосистемы бассейна реки Амур. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 287–293;
4. Зуев И. В., Яблоков Н. О. Первая находка ротана *Percottus glenii* Dybowski, 1877 (Perciformes: Odontobutidae) в бассейне Среднего Енисея // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология, 2013. Т. 6. № 3. С. 243–245.
5. Кутикова Л. А. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР: планктон и бентос. М.: Гидрометеиздат, 1977. 512 с.
6. Лукина И. И. Изменение питания ротана-головешки *Percottus glenii* Dybowski, 1877 в связи с ростом на примере популяции из водоема в бассейне р. Вилюя // Зоологические чтения ГрГМУ, 2012. С. 89–92.

7. Плюснина О. В. Питание ротана – *Perccottus glenii* Dybowski, 1877 (Odontobutidae, Pisces) в водоемах естественного и инвазийного ареалов // Поволжский экологический журнал. 2008. № 2. С. 120–125.
8. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных) «Пищевая промышленность». М., 1966. 377 с.
9. Пронин Н. М., Болонев Е. М. О современном ареале вселенца ротана *Perccottus glenii* (Perciformes: Odontobutidae) в Байкальском регионе и проникновении его в экосистему открытого Байкала // Вопросы ихтиологии. 2006. № 46 (4). С. 564–566.
10. Решетников А. Н., Петлина А. П. Распространение ротана (*Perccottus glenii* Dybowski, 1877) в реке Оби // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14 (4). С. 551–555.
11. Решетников А. Н., Чибилев Е. А. Распространение ротана (*Perccottus glenii* Dybowski, 1877) в бассейне р. Иртыш и анализ возможных последствий для природы и человека // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. С. 405–411.

## **ЭКОЛОГО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ**

УДК 664.8:492.2

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВИТАМИННОГО СОСТАВА ПЛОДОВ ТЫКВЫ РАЗНЫХ СОРТОВ**

**М.М. Иванов, О.А. Хропот**

**Научный руководитель д-р пед. наук И.В. Кротова**

*Сибирский федеральный университет*

Согласно концепции сбалансированного питания обеспечение нормальной жизнедеятельности возможно только при условии снабжения организма целым спектром различных по химической природе веществ, необходимых для протекания жизненно важных обменных процессов. К указанным веществам, в частности, относятся витамины.

Витамины – это группа низкомолекулярных органических соединений разнообразной химической природы, необходимых для питания человека в ничтожных количествах по сравнению с основными питательными веществами, но имеющих огромное значение для нормального обмена веществ, обеспечения вы-



сокого уровня работоспособности и психической стабильности. Витамины не синтезируются в организме человека и должны поступать с пищей. Данные статистики свидетельствуют о значительном дефиците в питании россиян витаминов С, А, Е, группы В, Д, антиоксидантов, микроэлементов. Последнее, в свою очередь, делает актуальной проблему обогащения продуктов повседневного спроса такими эссенцеальными компонентами пищи, как витамины.

В связи с этим целью настоящего исследования явилось изучение возможности повышения пищевой ценности продуктов питания за счет включения в рецептуру сырьевых компонентов, являющихся источниками витаминов и минеральных веществ. В качестве такого источника нами было предложено использовать недооцениваемое в последнее время растительное сырье – мякоть плодов тыквы. Задача исследования заключалась в установлении витаминного состава плодов тыквы сортов «Витаминная», «Мичуринская» и «Миндальная 35». Все указанные сорта районированы на территории Красноярского края.

Образцы для исследования были собраны в пригородной зоне города Красноярска в конце августа 2013 года. После уборки плоды изучаемых сортов заложили на хранение для послеуборочного дозревания при температуре 18–20 °С. Исследование витаминного состава анализируемой биомассы было выполнено в лаборатории физико-химических исследований пищевых продуктов кафедры технологии и организации общественного питания Сибирского федерального университета в октябре–ноябре 2013 года.

Определение влажности и зольности анализируемого растительного сырья проводили по стандартным методикам, а содержание ионов тяжелых металлов – методом атомно-абсорбционного анализа. Количественное определение аскорбиновой кислоты в мякоти плодов тыквы изучаемых сортов осуществлено по методике С. М. Прокошева, β-каротина, тиамина, рибофлавина и фолиевой кислоты – методом спектрофотометрии, а токоферолов и Р-активных веществ – по стандартным методикам.

В связи с тем, что анализируемая биомасса рассматривалась нами как возможный природный источник витаминов для организма человека, прежде всего методом атомно-абсорбционного анализа было установлено содержание тяжелых металлов в данном растительном сырье. Полученные результаты представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Содержание ионов тяжелых металлов в анализируемой биомассе

№ образца	Сорт тыквы	Содержание тяжелых металлов, мг/кг				
		Pb	Cd	As	Hg	Zn
1	Витаминная	1,03±0,05	0,24±0,05	1,03±0,05	0,18 ±0,05	1,32±0,05
2	Мичуринская	1,21±0,05	0,19±0,05	1,09±0,05	0,21±0,05	1,27±0,05
3	Миндальная 35	1,17±0,05	0,28±0,05	1,00±0,05	0,23±0,05	1,33±0,05

Как следует из приведенных данных, мякоть плодов тыквы изучаемых сортов содержит ионы вышеуказанных полютантов в количествах, значительно меньших, чем их предельно допустимые концентрации. Таким образом, исследуемое растительное сырье является экологически безопасным по данному классу загрязнителей и может быть рекомендовано в качестве источника микронутриентов природного происхождения для обогащения последними продуктов питания.

Результаты исследования витаминного состава мякоти плодов тыквы сортов «Витаминная», «Мичуринская» и «Миндальная 35» представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Содержание витаминов в анализируемой биомассе (мг %)

Определяемый показатель	Наименование сорта тыквы		
	Витаминная	Мичуринская	Миндальная 35
Каротин	7,23±0,05	7,92±0,05	1,81±0,05
Витамин С	15,61±0,05	27,24±0,05	14,33 ±0,05
Витамин В <sub>1</sub>	0,52±0,05	0,48±0,05	0,20±0,05
Витамин В <sub>2</sub>	0,07±0,05	0,08±0,05	0,06±0,05
Витамин В <sub>9</sub>	0,06±0,05	0,07±0,05	0,05±0,05
Витамин Е	0,46±0,05	0,58±0,05	0,32±0,05
Витамин РР	0,76±0,05	0,82±0,05	0,54±0,05

Из данных табл. 2 видно, что по всем показателям наиболее качественные плоды тыквы сорта «Мичуринская». Незначительно по витаминному составу от них отличаются плоды тыквы сорта «Витаминная». Самыми низкокачественными по анализируемым показателям среди изученных оказались плоды тыквы сорта «Миндальная 35». Так, содержание каротина в них более чем в четыре раза ниже, чем в плодах сорта «Мичуринская». Однако именно каротин является предшественником витамина А, с наличием которого связана способность пищевых продуктов воздействовать на зрительные функции глаза, в частности на повышение остроты зрения и улучшение ночного зрения.

По содержанию витамина С бесспорным лидером среди изученных образцов явились плоды тыквы сорта «Мичуринская». В них содержание аскорбиновой кислоты почти в два раза выше, чем в сортах «Витаминная» и «Миндальная 35». Известно, что витамин С является одним из жизненно важных БАВ, так как участвует в окислительно-восстановительных процессах, положительно действует на центральную нервную систему, повышает сопротивляемость организма человека к экстремальным воздействиям. При недостатке этого микронутриента нарушается обмен в соединительной ткани, повышается проницаемость капилляров, что, в свою очередь, может быть причиной кровоизлияний и цинги. Поэтому чрезвычайно важно сочетание в пище аскорбиновой кислоты с Р-активными веществами, характеризующее высокой капилляроукрепляющей способностью. Следует отметить, что образцы анализируемой биомассы по содержанию витамина РР отличаются незначительно.

Плоды сорта «Миндальная 35» почти в два раза меньше содержат и витамин Е в сравнении с сортами «Мичуринская» и «Витаминная». Данное обстоятельство также снижает их биохимическую ценность, так как именно токоферолы обеспечивают устойчивое состояние нервной и эндокринной систем, нормализуют процессы обмена веществ в скелетных и сердечной мышцах, печени; способствуют укреплению иммунной системы.

Наконец, анализ наличия витаминов группы В показал, что мякоть плодов тыквы исследуемых сортов содержит незначительное их количество (рис. 1). Причем различие в содержании рибофлавина и фолиевой кислоты в зависимости от сорта растения незначительно и находится в пределах ошибки определения.

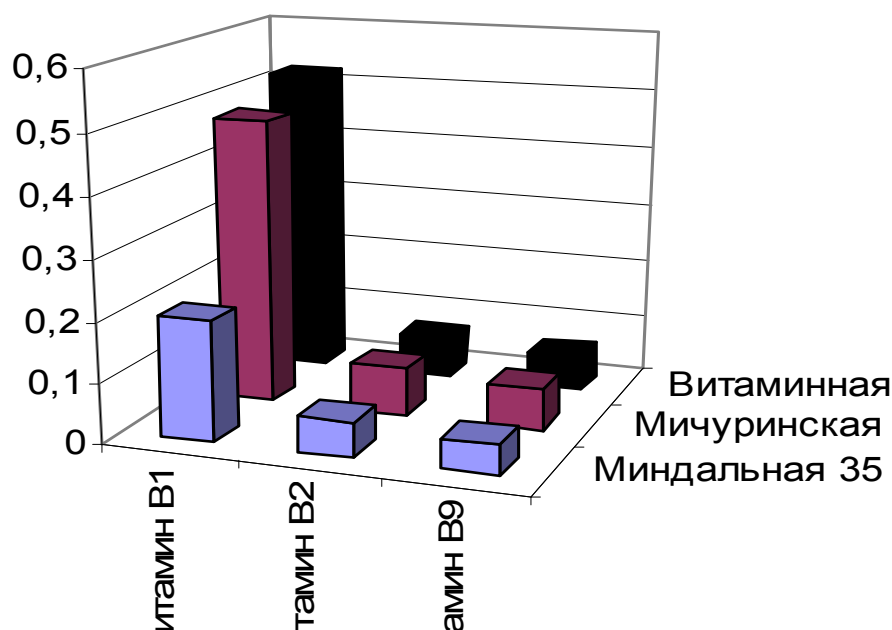


Рис. 1. Содержание витаминов группы В в мякоти плодов тыквы разных сортов

Таким образом, на основе проведенного исследования витаминного состава мякоти плодов тыквы сортов, районированных на территории Красноярского края, можно констатировать, что анализируемая биомасса является естественным источником целого спектра жизненно важных витаминов для организма человека. При этом с точки зрения количественного содержания витаминов наиболее качественными являются плоды тыквы сорта «Мичуринская», а наименее качественными – сорта «Миндальная 35». Кроме того, исследуемое растительное сырье не обладает ярко выраженной способностью к накоплению тяжелых металлов и может быть рекомендовано в качестве источника микронутриентов природного происхождения для обогащения последними продуктов питания.

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВИНЦА НА РАСТЕНИЕ ГОРОХ РАСТИТЕЛЬНЫЙ *PISUM SATIVUM*

**И.В. Свобода**

**Научный руководитель канд. хим. наук Л.Г. Бондарева**

*Сибирский федеральный университет*

В настоящее время свинец занимает первое место среди причин промышленных отравлений. Это вызвано широким применением его в различных отраслях промышленности.

Загрязнение окружающей среды свинцом и его соединениями является наиболее острым и опасным. На каждый квадратный метр суши в течение года антропогенным путем в среднем выпадает 5,6–9,5 мг свинца. Основным источником загрязнения атмосферного воздуха свинцом в РФ является автотранспорт, использующий свинецсодержащий бензин. Автомобильный парк выбрасывает ежегодно в атмосферу 10 млрд абсолютно смертельных доз свинца, или в весовых единицах – 250 кило тонн металла. Немалую роль в загрязнении свинцом играют отработанные аккумуляторы, отравляющие почву соединениями свинца.

На территории промышленной агломерации, которой является г. Красноярск и территории вокруг него, эта тема наиболее актуальна, так как автомобильный парк города с каждым годом увеличивается, следовательно, увеличивается и количество свинца в окружающем воздухе и почве.

Целью работы явилось изучение влияния внесенной соли свинца различной концентрации на сельскохозяйственную культуру горох растительный *Pisum sativum*.

Для проведения эксперимента использовалась почва, отобранная осенью на дачных участках Октябрьского района г. Красноярска. Отбор почвы производили в соответствии с ГОСТ 28168-89. Почвы предварительно подготовили к эксперименту: отсылали крупные фрагменты и растительные остатки, через сито, с диаметром ячеек 2 мм.

Внесли в почву загрязнитель (соль свинца) в количестве 10 и 5 ПДК, учитывая, что ПДК свинца 30 мг/кг, то в пересчете на наши системы было внесено 120 и 60 мг соответственно. В качестве растительного материала использовался горох растительный (*Pisum sativum*). Велось наблюдение и полив растений в течение двух недель. По окончании эксперимента определялись морфологические изменения растений методом замедленной флуоресценции – ФОТОН 10. Анализ изменения состава биологических фрагментов проводился методом ИК-спектроскопии – ИК Фурье спектрометром Nicolet 380. После измерений определялось содержание свинца в растительной биомассе, после предварительного «мокрого сжигания» в присутствии перекиси водорода. Содержание свинца определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии – *Agilent*.

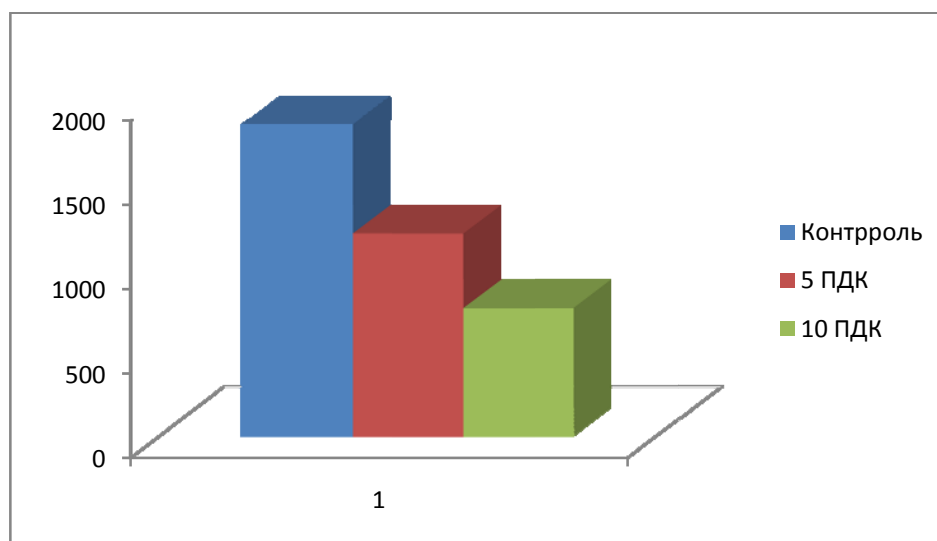
По окончании эксперимента биомассу растений аккуратно срезали и поместили в флуориметр для измерения замедленной флуоресценции. Полученные результаты представлены на рисунке.

**Таблица.** Функциональные группы, содержащиеся в образцах

Частоты поглощения, см <sup>-1</sup>														
Полиассоциаты			Колебания метильной группы			Сульфатная группа			Амины			Спирты		
К	5 ПДК	10 ПДК	К	5 ПДК	10 ПДК	К	5 ПДК	10 ПДК	К	5 ПДК	10 ПДК	К	5 ПДК	10 ПДК
3270,3	3270,5	3271,9	2917,1	2917,0	2916,6	1726,6	1726,6	1726,6	1398,6	1397,9	1397,9	1311,8	1308,7	1308,7

Разница значений флуоресценции в составных частях растений составила по отношению к контролю: для 5 ПДК – до 35 %, для 10 ПДК – до 60 %.

После высушивания биомассы проводились исследования с использованием ИК-Фурье-спектрометра. Результаты приведены в таблице.



*Рис. Анализ биомассы методом замедленной флуоресценции*

При внесении соли свинца наблюдалось незначительное изменение частот колебания по отношению к контролю для следующих групп: увеличение частоты колебания полиассоциатов на 0,006 % для 5 ПДК и на 0,049 % для 10 ПДК; уменьшение частоты колебания метильной группы на 0,003 % для 5 ПДК и на 0,017 % для 10 ПДК; уменьшение частоты колебания амино группы на 0,05 % при внесении обеих концентраций; уменьшение частот колебания спиртов на 0,24 % при внесении обеих концентраций.

Методом атомной абсорбции было определено, что содержание свинца в биомассе менее предела обнаружения, т. е. менее 2 мг/кг сухого веса.

На основании полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Значительное отклонение результатов замедленной флуоресценции по отношению к контролю, в пределах 35 % для 5 ПДК и 60 % для 10 ПДК, показывает, что внесение соли свинца в почву значительно влияет на развитие растения – гороха.

2. Методом ИК-спектроскопии на реальных экспериментальных системах «почва – горох – ацетат свинца» обнаружено, что внесенные количества свинца (5–10 ПДК) практически не повлияли на структуру биомассы исследуемых растений (горох). Это было подтверждено методом атомной абсорбции, результаты которой показали, что содержание свинца в биомассе ниже предела обнаружения прибора.

УДК 615.332:582.998.2.03

## **ИЗУЧЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРЯНОСТИ «ШАФРАН» КАК СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АУТЕНТИЧНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ *CROCUS SATIVUS* (ШАФРАН ПОСЕВНОЙ)**

**Д.М. Закирова**

**Научный руководитель канд. хим. наук Л.В. Наймушина**

*Сибирский федеральный университет*

Весьма перспективным направлением для создания функциональных продуктов является использование в качестве нетрадиционных добавок пряно-ароматических растений. Высокое содержание биологически активных соединений определяет их значимую роль не только как вкусовых веществ, но и как лечебно-физиологических активаторов, действующих на гормональном уровне регуляции нервной и пищеварительной систем организма.

В предложениях производителей кулинарных специй очень давно существует уникальная дорогостоящая пряность – шафран посевной – *Crocus sativus*. Для получения специи используют рыльца цветов крокуса. Высокая стоимость пряности объясняется тем, что цветет растение только осенью и всего лишь семь дней, при этом сбор и обработка осуществляется вручную. Для получения килограмма шафрана нужно собрать около 150 000 цветов.

Вид «шафран посевной» входит в род «шафран» (*Crocus*) подсемейства *Crocoideae* семейства «ирисовые» (*Iridaceae*) порядка «спаржецветные» (*Asparagales*). С древних времен шафрану приписывают уникальные лечебные свойства. Известно, что применение данной пряности снимает боль, депрессию и меланхолию, так

как способствует выработке серотонина – гормона радости. В современной медицине польза шафрана определена как сильнейшего антиоксиданта: пряность обладает антиканцерогенными и антимуtagenными свойствами, препятствует разрушению клеток свободными радикалами и способствует их регенерации. Благодаря активным компонентам, входящим в состав пряности, отмечено ее положительное воздействие на функционирование нервной, пищеварительной и кровеносной систем человека. Доказано, что шафран нормализует кровяное давление, качественно улучшает состав крови, способствует увеличению количества эритроцитов и стабилизирует работу сердечной мышцы. Специалисты рекомендуют употреблять шафран при анемии, нарушении функционирования желчного пузыря и селезенки, при импотенции, бесплодии и ряде других серьезных заболеваний.

В кулинарии шафран используется для придания тонкого аромата, пряного вкуса и красивого золотистого цвета супам, мясным, рыбным, овощным блюдам и десертам. Считается, что как кулинарная специя шафран позволяет тканям организма усваивать пищу более рационально.

Огромный интерес и высокая цена вынуждают недобросовестных поставщиков подделывать шафран и, в связи с этим, нет никакой гарантии приобретения подлинного товара. Кроме того, в последнее время в рыночной продаже появились специи, имеющие аналогичное название и похожие визуально, но более дешевые по стоимости. В связи с этим представляет интерес определение подлинности некоторого ароматного порошка с торговым названием «Шафран» путем аналитического сравнения с известными популярными пряностями. В случае фальсификата анализ может дать необходимую информацию об исходном сырье, компоненты которого, вполне вероятно, могли быть использованы для имитации настоящего шафрана.

Целью данной работы явилось определение подлинности специи, продаваемой под торговым названием «Шафран». В задачи исследования входили: изучение состава летучих компонентов эфирного масла названной специи методом хромато-масс-спектрометрии и сравнение с компонентным составом эфирных масел некоторых органолептически похожих популярных пряностей.

В качестве сырья использовали специи урожая 2011–2012 гг., существующие в свободной продаже в специализированных торговых отделах по реализации пряностей под торговыми названиями «Шафран» и «Куркума». Эфирные масла получали методом гидродистилляции из воздушно-сырого сырья в течение 12–14 ч с использованием стеклянной колбы и насадки Клевенджера. Содержание эфирного масла составляло 1–1,5 % по отношению к абсолютно сухой навеске каждого вида сырья.

Анализ эфирного масла проводился методом хромато-масс-спектрометрии (ГХ/МС) с использованием газожидкостного хроматографа «Agilent Technologies 7890 А» фирмы «Hewlett Packard» с квадрупольным масс-спектрометром MSD 5975 С. Идентификация разделенных компонентов проводилась по индексам удерживания на основе библиотеки масс-спектров Wiley275 и атласа масс-спектров. Содержание компонентов рассчитывали по площадям соответствующих хроматографических пиков.

**Результаты и их обсуждение.** В табл. 1 представлены результаты исследования компонентного состава эфирного масла методом хромато-масс-спектрометрии пряности под торговым названием «Шафран». Анализ показал, что в составе эфирного масла названной пряности содержится более 25 компонентов, из которых 22 соединения, на которые приходится 98,7 % от суммы всех компонентов масла, идентифицированы. Состав эфирного масла представлен преимущественно моно- и сесквитерпеноидами – кислородсодержащими летучими соединениями (более 75 вес. %). Ими представлены кетоны: аг-дигидро-турмерон, аг-турмерон, курлон, вульгарон; аг- куркумен и спирты: метилэвгенол, терпинен-4-ол, метилхавикол и бензиловый спирт, окси-эфиры: сафрол и миристицин. Известно, что именно кислородсодержащие летучие соединения обеспечивают устойчивый и индивидуальный аромат эфирного масла любой пряности. Из бескислородных монотерпенов выявлен лишь  $\gamma$ -терпинен с общим содержанием менее 1 вес. %. Общее количество сесквитерпенов ( $\alpha$ -кубебен, кариофиллен, купарен, (E,E)- $\alpha$ -фарнезен и  $\beta$ -сесквифелландрен) составляет 7,2 вес. %. Достаточно большое количество в общем составе масла (до 10,5 вес. %) приходится на насыщенный алифатический углеводород *n*-нонадекан.

**Таблица 1.** Компонентный состав эфирного масла пряности под торговым названием «Шафран»

№ п/п	Линейный индекс удерживания	Компонент	Содержание, вес. %
1	1033	Бензиловый спирт	2,3
2	1058	$\gamma$ -Терпинен	0,7
3	1100	Линалоол	1,8
4	1171	Терпинен-4-ол	4,6
5	1199	Метилхавикол	6,1
6	1289	Сафрол	2,1
7	1351	$\alpha$ -Кубебен	1,2
9	1406	Метилэвгенол	2,1
10	1422	Кариофиллен	1,1
11	1485	Аг-куркумен	2,3
12	1507	Купарен	1,9
13	1510	(E,E)- $\alpha$ -фарнезен	0,8
14	1523	Миристицин	1,5
15	1524	$\beta$ -Сесквифелландрен	2,2
16	1595	Аг-дигидро-турмерон	1,2
17	1601	Вульгарон А	3,2
19	1666	Аг-турмерон	39,0
20	1742	Курлон	12,8
21	1777	(E)- $\alpha$ -атлантон	1,3
22	1900	<i>n</i> -Нонадекан	10,5
ИТОГО			98,7



Согласно литературным данным в состав эфирного масла подлинного растения *Crocus sativus* входит уникальный для данной культуры летучий компонент – сафрональ (до 70 вес. %), являющийся продуктом гидролиза гликозида пикрокроцин (рис. 1).

Наши результаты по определению компонентного состава эфирного масла пряности под торговым названием «Шафран» свидетельствуют об отсутствии данного соединения. В небольшом количестве (2,1 вес. %) в эфирном масле изучаемой специи регистрируется лишь сафрол или 3,4-метилендиокси-1-аллилбензол, который входит в состав масел более чем 70 растений-эфироносов. Следовательно, проведенный анализ говорит о возможной фальсификации изучаемого продукта.

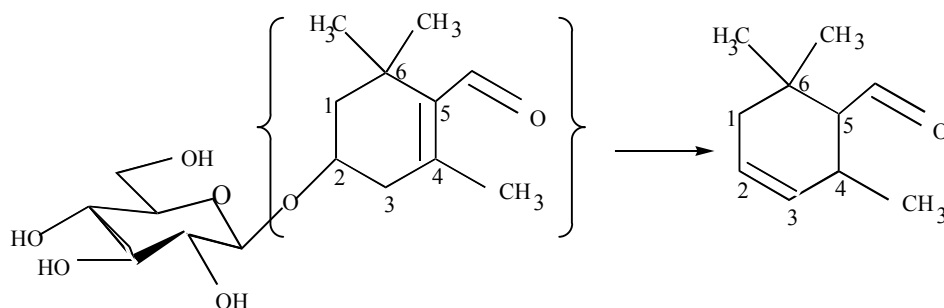


Рис. 1. Схема образования сафроналя – основного компонента эфирного масла культуры *Crocus sativus* путем гидролиза гликозида пикрокроцин

По предварительным органолептическим характеристикам порошок специи «Шафран» похож на измельченное корневище куркумы (*Curcuma*), но в цветовых оттенках преобладает яркий красно-оранжевый тон, в отличие от золотисто-желтого для куркумы. В ароматах порошков можно определить трудноуловимые похожие нюансы, но все же, в целом, сравниваемые специи достаточно индивидуальны. На вкус они также лишь слегка различаются, хотя оба порошка терпкие, горьковатые, с небольшой долей жгучести. Насыщенный цвет и пряно-вкусовые нюансы куркумы могут служить хорошим заменителем *Crocus sativus*, при этом имея стоимость значительно ниже. В связи с этим, основной акцент в исследовании был сделан на сравнении компонентного состава эфирных масел пряностей с торговыми названиями «Шафран» и «Куркума».

Куркума – это собирательное название всех видов, которые относятся к данному роду растений. Как правило, в кулинарии используют корень куркумы – *Curcuma longa* L. Нами исследован состав эфирного масла пряности под торговым названием «Куркума» (табл. 2). В композиции содержится более 22 компонентов, из которых 17, составляющие 97,4 % от суммы всех компонентов масла, идентифицированы.

Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о достаточно высокой аналогии исследуемых композиций (табл. 1–2). Основными действующими веществами эфирного масла культуры *Curcuma* являются кетоны: аг-дигидротурмерон и α-турмерон, на которые приходится около 55 вес. % (рис. 2). В со-

ставе эфирного масла пряности «Шафран» содержание аг-турмерона также является максимально преобладающим – 39 вес. %. Также одинаковыми компонентами в эфирных маслах сравниваемых специй являются вульгарон, аг-куркумен,  $\beta$ -сесквифелландрен, бензиловый спирт, слегка различающиеся содержанием в общем составе композиций.

**Таблица 2.** Компонентный состав эфирного масла пряности под торговым названием «Куркума»

№ п/п	Линейный индекс удерживания	Компонент	Содержание, вес. %
1	973	Сабинен	0,8
2	1022	Мета-цимен	0,3
3	1033	Бензиловый спирт	1,7
4	1112	Менза-1,3,8-триен	0,5
5	1442	$\gamma$ -Корайен	0,7
6	1485	Аг-куркумен	5,2
7	1496	$\alpha$ -Цингиберен	3,9
9	1511	$\beta$ -Бисаболен	1,0
10	1524	$\beta$ -Сесквифелландрен	5,3
11	1595	Аг-дигидро-турмерон	2,0
12	1601	Вульгарон А	4,2
13	1632	Эпи-кубенол	1,1
14	1670	$\alpha$ -Турмерон	52,0
15	1746	Акоренолацетат	16,5
16	1753	Неопетазон	0,5
17	1777	(Е)- $\alpha$ -атлантон	1,7
ИТОГО			97,4

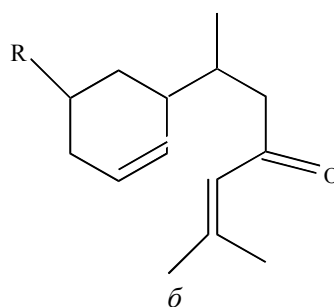
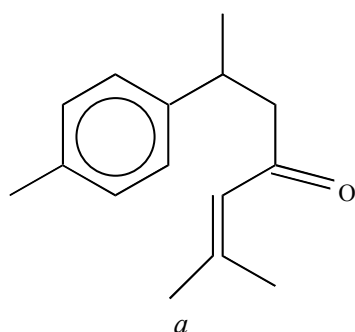


Рис. 2. Основные действующие вещества эфирного масла культуры *Curcuma*: аг-дигидро-турмерон (а) и  $\alpha$ -турмерон (б)

Проведенные исследования компонентного состава эфирных масел пряностей с торговыми названиями «Шафран» и «Куркума» указывают на их близкую аналогию. Непринципиальные различия в продаваемых специях можно объяснить как различным соотношением культивируемых видов рода «*Curcuma*», так и климатическими особенностями выращивания пряностей. Как правило, при продаже специй упускаются такие подробности, как ботаническое описание культуры и регион ее произрастания.

Лечебные свойства куркумы, также как и шафрана, были известны с давних времен. Однако современные медицинские исследования показали, что фармакологическое действие куркумы скорее преувеличено. Был выявлен и ряд противопоказаний при применении растения. Оказалось, что пряность обладает лишь умеренным противовоспалительным действием, но действительно улучшает секрецию желудочно-кишечного тракта и стимулирует процессы желчеобразования, что положительно сказывается на пищеварении и обмене веществ в организме.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для создания функциональных продуктов и использования в качестве нетрадиционных добавок пряно-ароматических растений важно быть уверенным в подлинности применяемой пряности и не пренебрегать методами аналитического контроля для устранения возможной фальсификации сырья.

Научное издание

МОЛОДЕЖЬ И НАУКА

В трех томах

Том 2

Ответственный за выпуск  
**Тамаровская Анастасия Николаевна**

Подготовлено к публикации ИЦ БИК СФУ

Подписано в печать 25.08.2014 г. Формат 60×84/16

Бумага офсетная. Печать плоская.

Усл. печ. л. 16,3. Уч.-изд. л. 13,2

Тираж 100 экз. Заказ 2283

Корректор: *М. В. Саблина*  
Компьютерная верстка *А. А. Быковой*

Издательский центр  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
Тел/факс (391)206-21-49. E-mail [rio@sfu-kras.ru](mailto:rio@sfu-kras.ru)  
<http://rio.sfu-kras.ru>

Отпечатано Полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел/факс (391) 206-26-49; тел. 206-26-67  
E-mail: [print\\_sfu@mail.ru](mailto:print_sfu@mail.ru); <http://lib.sfu-kras.ru>