

УДК 621.313.32

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ВТСП-ПРОВОДАХ И ИЗДЕЛИЯХ

**Е. Н. Андреев,**

ведущий инженер

**Д. А. Волков,**

ассистент

**А. Р. Орлов,**

заведующий лабораторией

**С. С. Тимофеев,**

старший преподаватель

**М. А. Турубанов,**

аспирант

**Л. И. Чубраева,**

член-корр. РАН

**В. Ф. Шишлаков,**

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрены вопросы, связанные с поведением высокотемпературных сверхпроводников ленточного типа при питании постоянным и переменным током. Выполнено физическое моделирование различных типов электрических соединений высокотемпературной сверхпроводниковой ленты и определены наиболее перспективные варианты для изготовления высокотемпературных сверхпроводниковых устройств. Проведена серия физических экспериментов из соленоидальных высокотемпературных сверхпроводниковых катушек. Получены принципиально новые данные, которые могут быть использованы при изготовлении высокотемпературных сверхпроводниковых электрических машин, трансформаторов, ограничителей тока, накопителей энергии.

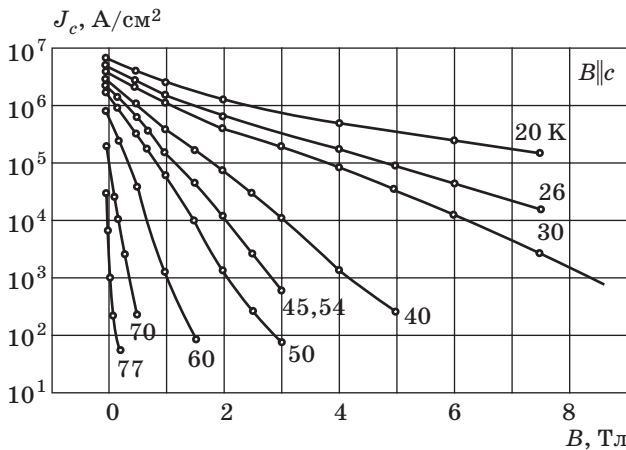
**Ключевые слова** — высокотемпературный сверхпроводник, критические параметры, электрические соединения, соленоиды.

### Введение

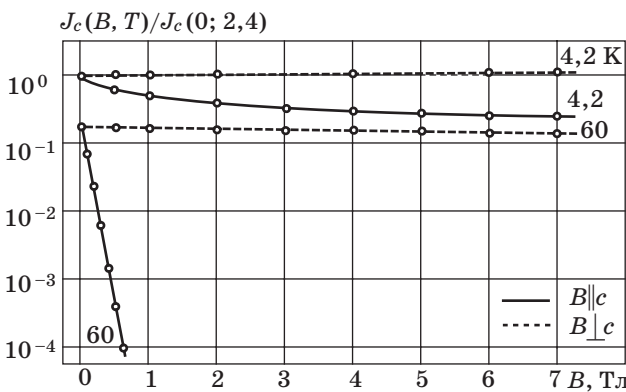
Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), в отличие от низкотемпературных сверхпроводников, характеризуются анизотропией, которая усиливается по мере роста рабочей температуры от уровня жидкого гелия (4,2 К) до уровня жидкого азота (77,3 К). Этот процесс характеризуется различием в критических плотностях тока (плотностях тока, при которых сверхпроводник переходит в резистивное состояние) в зависимости от направления магнитного поля: параллельно или перпендикулярно плоскости ВТСП для тонких пленок или параллельно и перпендикулярно широкой стороне ленты. На рис. 1 [1] показана взаимосвязь между критической плотностью  $J_c$  тока, индукцией магнитного поля  $B$  и направлением магнитного поля относительно сверхпроводника.

Из приведенных данных видно, что даже при благоприятном направлении магнитного поля существует резко выраженная зависимость критической плотности тока от величины магнитного поля (рис. 2), особенно при температуре жидкого азота, на которую ориентируется большинство разработчиков ВТСП электротехнических устройств.

Провода из ВТСП-материалов выпускаются в виде плоских лент, содержащих ВТСП-волокна в матрице из нормального металла. При разработке ВТСП-устройств возникает несколько проблем. Во-первых, необходимо экспериментально исследовать используемые провода по более широкой программе, чем это делает предприятие-изготовитель. Результаты этих экспериментов закладываются в расчеты при проектировании ВТСП-устройств.



■ Рис. 1. Взаимосвязь между критической плотностью тока, индукцией магнитного поля и направлением магнитного поля относительно сверхпроводника



■ Рис. 2. Зависимость критической плотности тока от величины магнитного поля

Во-вторых, при изготовлении различных типов ВТСП-устройств необходимо выполнять электрические соединения. Это достаточно серьезная проблема, поскольку такое соединение должно быть механически прочным, иметь минимальное электрическое сопротивление и обеспечивать сверхпроводящее состояние изделия.

Как видно из рис. 2, наиболее высокие критические параметры у ВТСП-материалов достигаются в собственном магнитном поле. При изготовлении любого изделия, например соленоида, магнитное поле увеличивается. Наличие ферромагнитных материалов, являющихся неотъемлемой частью большинства ВТСП-устройств, приводит к дополнительному росту магнитного поля и, соответственно, к еще большему снижению критического тока. Поэтому окончательный выбор рабочих параметров ВТСП-устройств (генераторов, двигателей, трансформаторов, ограничителей тока, накопителей энергии) основан на экспериментальных данных, полученных при физи-

ческом моделировании процессов как в ВТСП-проводах, так и в изделиях из них.

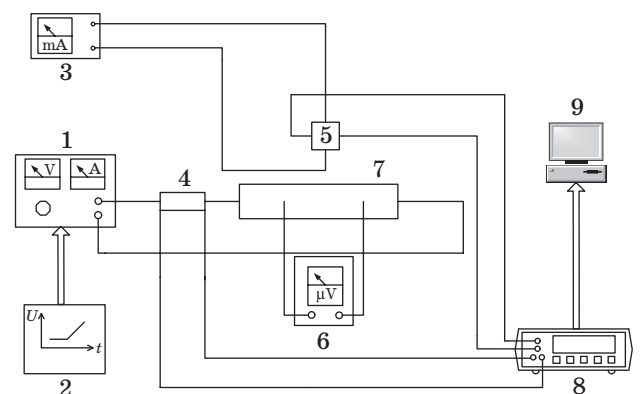
### Определение критических параметров ВТСП-проводов

Для физического моделирования процессов в коротких образцах ВТСП-ленты была создана специальная установка (рис. 3) [2]. Она позволяет определять критические параметры ВТСП-ленты в собственном поле и во внешних магнитных полях при изменении скорости заведения транспортного тока в широких пределах. В процессе экспериментов измеряются вольт-амперные характеристики (ВАХ) ленты при температуре жидкого азота.

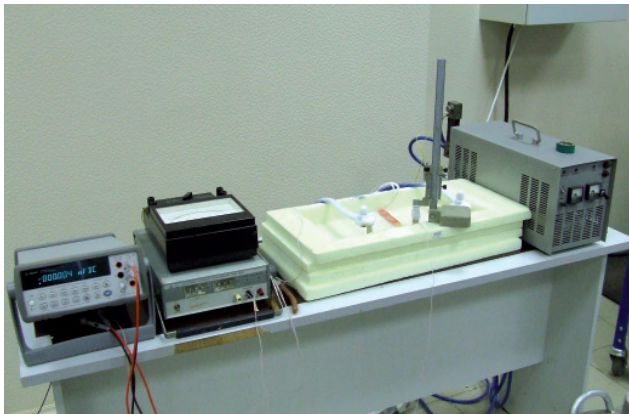
Критерием перехода исследуемого сверхпроводника в резистивное состояние является появление напряжения нормальной зоны 1 мкВ на 1 см длины образца.

Короткий образец ВТСП-ленты 7 припаивается мягким припоем к медным тоководам, которые закреплены на технологической оправке. В средней части к образцу припаяны 2 потенциальных конца на расстоянии 1 см друг от друга для регистрации сигнала нормальной зоны устройством обнаружения 6. Система питания образца состоит из стабилизированного источника постоянного тока 1 на ток 250 А-5 В и блока управления 2.

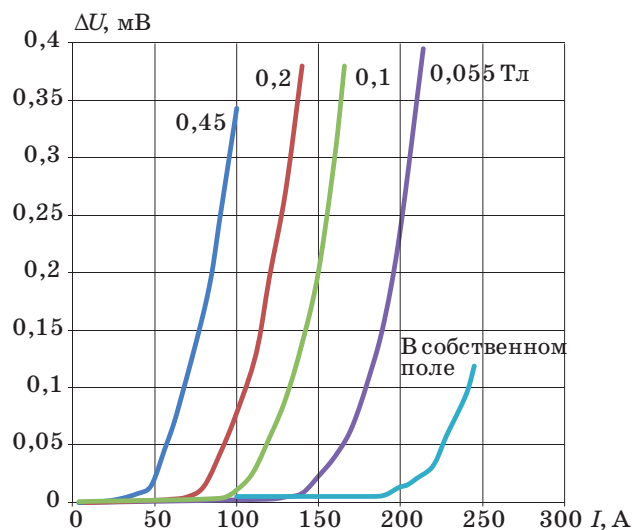
Внешнее магнитное поле, перпендикулярное широкой стороне ленты, формируется с использованием высококоэрцитивных магнитов. Контроль величины индукции магнитного поля осуществляется преобразователем Холла 5. Вольтметр 8 и ПК 9 служат для сбора, обработки и хранения результатов измерений.



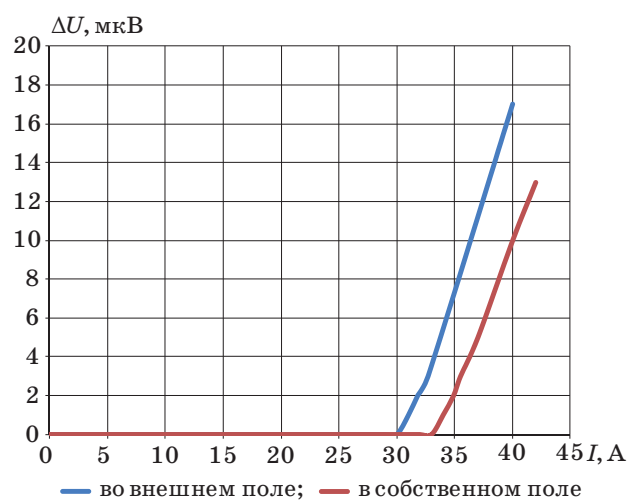
■ Рис. 3. Функциональная схема установки: 1 — источник питания ВТСП-образца; 2 — блок управления источником питания; 3 — источник питания измерителя индукции; 4 — токоизмерительный шунт; 5 — измеритель индукции; 6 — устройство обнаружения нормальной зоны; 7 — образец; 8 — вольтметр; 9 — персональный компьютер



■ Рис. 4. Внешний вид установки для испытаний коротких образцов ВТСП-ленты



■ Рис. 5. ВАХ ВТСП-ленты при исследованиях на постоянном токе



■ Рис. 6. ВАХ ВТСП-ленты при питании переменным током (внешнее поле 0,1 Тл)

Установка позволяет определять максимально допустимые скорости изменения транспортного тока в ВТСП, при которых происходит переход сверхпроводника в резистивное состояние. Скорость изменения тока регулируется дискретно в блоке управления 2 путем изменения постоянной времени интегратора.

Для исследований использовалась лента размером  $4,7 \times 0,38$  мм на основе висмутовой керамики. Процесс исследований показан на рис. 4, а на рис. 5 — результаты исследований ленты при питании постоянным током в среде жидкого азота, в собственном магнитном поле сверхпроводника и во внешнем магнитном поле, действующем перпендикулярно.

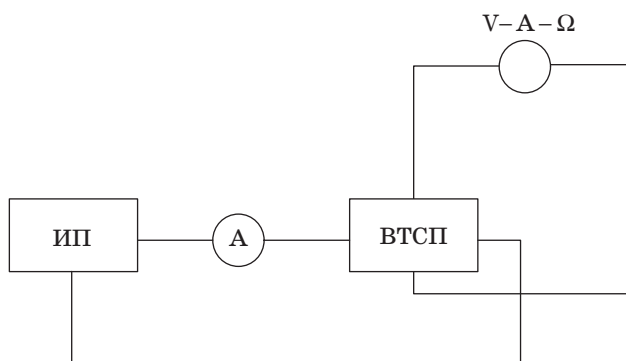
Следующий этап исследований представлял наибольший интерес, поскольку именно он давал возможность оценить устойчивость ленты к воздействию переменных токов и внешних магнитных полей. Из приведенных результатов (рис. 6) видно, что на переменном токе критические параметры ленты существенно ниже, чем на постоянном токе. Следует, однако, отметить, что это не говорит о нецелесообразности применения ВТСП-ленты на переменном токе. Уже освоены и выпускаются ВТСП-ленты с твистированными ВТСП-волокнами, предназначенные для применения на переменном токе. Однако они пока еще относительно дороги. Кроме того, даже при сравнительно низких критических параметрах на переменном токе лента обладает невысокими потерями, в основном гистерезисными.

### Исследование электрических соединений ВТСП-проводов

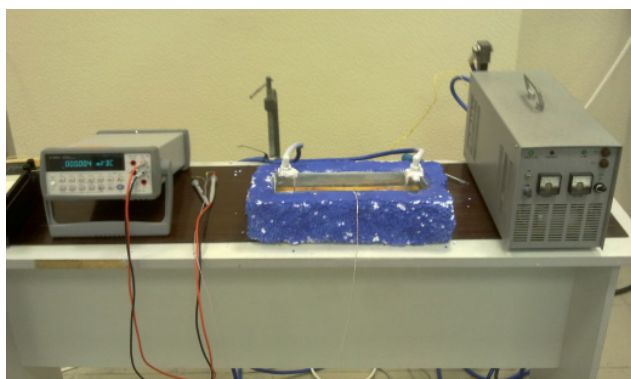
Ниже представлены результаты экспериментальных исследований нескольких вариантов электрических соединений ВТСП-ленты, выполненных методом пайки. При испытаниях измерялось сопротивление постоянному току вариантов спаев коротких образцов ВТСП-ленты в среде жидкого азота. Показано, что имеется возможность достичь удовлетворительных результатов в создании паяных соединений ВТСП-ленты различными способами.

В состав исследовательской установки, функциональная схема которой показана на рис. 7, входят источник питания ИП MS250, мультиметр НР 34401А, амперметр М2107. Установка для исследования сопротивления спаев в среде жидкого азота представлена на рис. 8 [3].

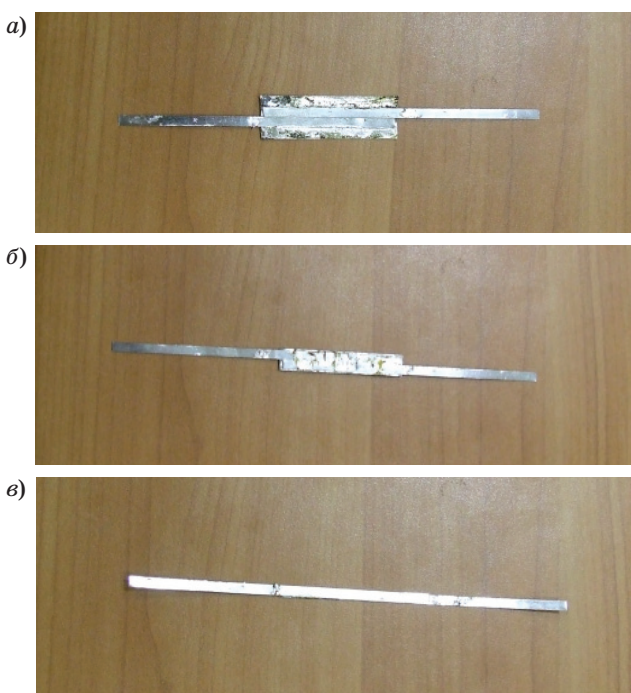
Зона спая при прохождении через нее электрического тока начинает разогреваться, что может вызвать переход ВТСП-ленты из сверхпроводящего в резистивное состояние. Были рассмот-



■ Рис. 7. Функциональная схема установки для исследования ВАХ спаев



■ Рис. 8. Установка для исследования сопротивления электрических соединений ВТСИ-ленты в среде жидкого азота

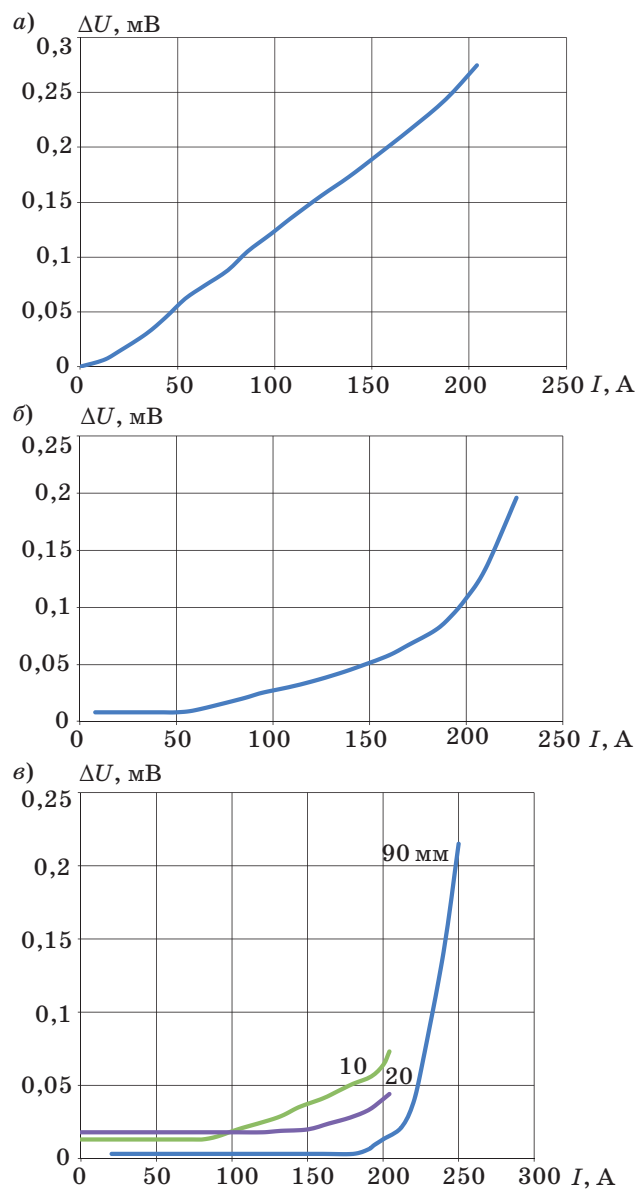


■ Рис. 9. Варианты исполнения спаев по медной ленте (а), по серебряной ленте (б), по матрице (в)

рены различные варианты исполнения соединений (рис. 9, а–в).

При испытаниях фиксировалось падение напряжения на длине спаев в зависимости от изменения величины постоянного тока. ВАХ спаев по медной и серебряной ленте представлены на рис. 10, а, б и по матрице при различной длине спаев — на рис. 10, в.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что соединение ВТСИ-ленты путем пайки целесообразно выполнять как по матрицам соединяемых сверхпроводников, так и по основанию из серебряной ленты, поскольку в диапазоне изменения постоянного тока от 0 до 50 А



■ Рис. 10. ВАХ спаев по медной ленте (а), по серебряной ленте (б) и различной длины по матрице (в)



падения напряжения на спаях, а следовательно, и сопротивления спаев постоянному току практически идентичны.

### Исследование плоского соленоида в собственном и внешних магнитных полях

Для исследований были изготовлены несколько плоских соленоидов со следующими размерами: внутренний диаметр — 60 мм, внешний диаметр — 114 мм, толщина — 9 мм, количество витков — 110. Внешний вид соленоида показан на рис. 11.

На первом этапе было проведено определение индуктивности соленоидов и сопоставление с расчетными данными (таблица).

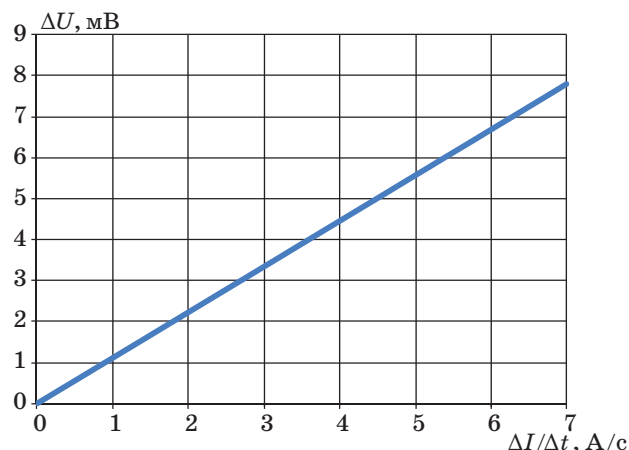
Результаты измерения падения напряжения на соленоиде при заведении тока с постоянной скоростью в среде жидкого азота показаны на рис. 12.

Результаты экспериментов по определению токонесущей способности соленоидов из ВТСП-ленты в собственном и внешнем магнитных полях при питании постоянным током и током промышленной частоты приводятся на рис. 13, а, б.

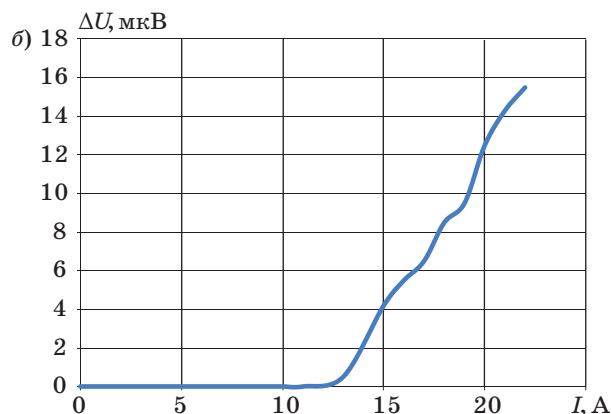
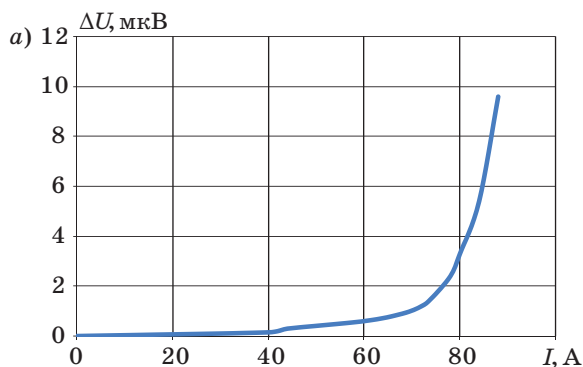
Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, контракт № 20.740.11.0070.



■ Рис. 11. Опытный образец катушки плоского соленоида из ВТСП-ленты



■ Рис. 12. Зависимость падения напряжения на ВТСП-катушки от скорости заведения тока



■ Рис. 13. ВАХ опытного ВТСП-соленоида, полученная на постоянном (а) и переменном (б) токе

#### ■ Расчетные и опытные величины индуктивности ВТСП-соленоида

Показатель	Измерения с помощью измерителя иммитанса			Измерение индуктивного напряжения на катушке	
	без железа	с железом	на расстоянии 15 мм от железа	при заведении тока с постоянной скоростью в среде жидкого азота	при питании малым переменным током частотой 50 Гц при комнатной температуре
Измеренная индуктивность, мГн	1,112	1,82	1,293	1,123	1,110
Расхождение с расчетным значением, %	0,2	0,4	4,3	0,9	0,4

### Заключение

Получен широкий спектр экспериментальных данных, определяющих характеристики ВТСП-ленты на основе висмутовой керамики. Результаты этих экспериментов могут быть использованы при разработке различных типов ВТСП-устройств, работающих на постоянном и переменном токах.

Разработаны варианты надежных электрических соединений ВТСП-ленты.

Несмотря на то, что рабочие характеристики ВТСП-ленты на переменном токе промышленной частоты не очень велики, ее можно использовать при создании соленоидов и обмоток небольших размеров. Следует также принимать во внимание, что потери в таких обмотках ниже,

чем в медных обмотках при комнатной температуре.

### Литература

1. **Handbook of Condensed Matter and Materials Data.** — Springer Berlin Heidelberg, 2005. — 1124 p.
2. **Андреев Е. Н.** и др. Экспериментальное исследование процессов в ВТСП проводах и соленоидах // Завалишинские чтения'11: Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2011. С. 43–49.
3. **Андреев Е. Н.** и др. Разработка надежных электрических соединений ВТСП ленты // Завалишинские чтения'11: Сб. докл. СПб.: ГУАП, 2011. С. 50–55.

## IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» — САИТ-2011

17–23 августа 2011 г.

Место проведения: Башкирия, Белорецкий р-н, пос. Новоабзаково, д/о Абзаково.

### Организаторы

Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН

Институт системного анализа РАН

Магнитогорский государственный университет

Челябинский государственный университет

Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Российская ассоциация искусственного интеллекта

Институт информационных технологий Болгарской академии наук

ООО «Технологии системного анализа»

Комитет РАН по системному анализу

Институт математики НАН Беларуси

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

### Направления работы

Теоретические аспекты системного анализа

Самоорганизация в сложных системах

Математические методы системного анализа и управления

Методы и информационные технологии поддержки принятия решений

Технологии автоматизации и управления

Динамика макросистем

Информационные технологии поиска и анализа информации

Информационные технологии в науке, образовании, медицине, экономике и промышленности

Информационная безопасность

Интеллектуальные технологии и системы

Методы приобретения и представления знаний интеллектуальными системами

Распознавание аудио-, видео- и графических образов

Распределенные и параллельные вычисления

Распределенная информационно-алгоритмическая среда для научных исследований

Автоматизация программирования

Проблемы неопределенности и риска в экономике

Управление развитием наукоемких и информационных технологий

Системный анализ социально-экономических процессов

Моделирование демо-экономических процессов

Проблемы устойчивого развития

Системное регулирование и управление

Методология системного подхода в новой информационной среде

### Дополнительная информация и справки

117312, Москва, Проспект 60-летия Октября, д. 9,

Институт системного анализа РАН

Жарова Наталия Юлиевна

Тел.: 7 (499) 135-51-64; факс: 7 (499) 783-91-32

Эл. адрес: [saitconf@gmail.com](mailto:saitconf@gmail.com)

Сайт: <http://www.isa.ru/sait>