Научно-теоретический и информационно-методический журнал Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований

Издается с III квартала 1997 г.

ВЕСТНИК ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 1 [55], 2011

Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации № 426 от 29.05.2009

Учредитель:
Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований

220072, г. Минск, пр. Независимости, 66; тел. 284-07-42, 284-25-05

Издатель:
РУП «Издательский дом «Беларуская навука»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
В. А. Орлович

Заместители главного редактора
Е. М. Бабосов
В. И. Недилько

Ответственный секретарь
Н. Н. Костюкович

Члены редколлегии:
В. Ф. Багинский
Н. Н. Бамбалов
А. В. Бильдюкевич
П. А. Витязь
И. В. Гайшун
М. И. Демчук
В. С. Камышников
А. К. Карабанов
А. В. Кильчевский
А. В. Кухарев
П. Д. Кухарчик
А. И. Лесникович
А. А. Махнач
А. Г. Мрочек
М. И. Мушинский
П. Г. Никитенко
В. Н. Новиков
В. П. Пархоменко
Б. А. Плотников
В. И. Прокошин
В. И. Стражев
Л. М. Томильчик
Ю. С. Харин
Л. В. Хотылева
И. И. Цыркун
В. Н. Шимов

Минск, 2011

Национальная академия наук Беларуси

СОДЕРЖАНИЕ

ДЕНЬ БЕЛОРУССКОЙ НАУКИ

Поздравление Президента Республики Беларусь с Днем белорусской науки 5

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СВЯЗИ

Протокол 8-го заседания Совместной комиссии НЦНИ и НАН Беларуси 6

ИТОГИ КОНКУРСОВ

Перечень международных научно-технических проектов «ГКНТ—Литва» 8
Конкурс совместных научных проектов БРФФИ и Национального центра научных исследований Франции «БРФФИ—НЦНИ-2011» 12
Конкурс совместных научных проектов фундаментальных исследований БРФФИ и Вьетнамской академии наук и технологий «БРФФИ—ВАНТ-2011» 15

КОНКУРСЫ БРФФИ: НОРМАТИВНАЯ БАЗА

Условия конкурса совместных научных проектов БРФФИ и Национального центра научных исследований Франции «БРФФИ—НЦНИ (PICS)-2012» 17
Конкурс на проведение белорусско-французских семинаров в 2011—2012 гг. 23
Условия конкурса совместных научных проектов фундаментальных исследований БРФФИ и Вьетнамской академии наук и технологий «БРФФИ—ВАНТ-2012» 25

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Кабашникова Л. Ф., Абрамчик Л. М., Макаров В. Н., Зеневич Л. А., Черленок Ю. И., Козловская З. Я., Устинов В. Н., Савченко Г. Е. Характеристика пигментного аппарата интродуцированных сортов винограда 30
Кожевников М. М., Ульянов Н. И., Субоч С. Н. Планирование траекторий сборочно-сварочных роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями 44
Сыса А. Г., Киселев П. А., Жабинский В. Н., Хрипач В. А. Взаимосвязь структура—функция при оценке антипролиферативной активности брассиностероидов в отношении раковых клеток молочной железы MCF-7 56
Маренкин С. Ф., Федорченко И. В., Кочура А. В., Трухан В. М., Лобановский Л. С., Шёлковая Т. В. Магнитные свойства эвтектического сплава системы InSb—MnSb 64
Рупасова Ж. А., Гаранович И. М., Шпитальная Т. В., Василевская Т. И., Варавина Н. П., Криницкая Н. Б. Особенности накопления органических кислот, терпеноидов и углеводов в плодах сортов кизила настоящего (*Cornus mas.* L.) украинской селекции при интродукции в условиях Беларуси 72
Боровой А. А., Шароваров Г. А. Проблемы чернобыльского объекта «Укрытие» 84
Лапицкая О. В. Экологическое обоснование спелости березовых и осиновых древостоев ... 92

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

Кушнир В. Н., Прищепа С. Л. Тонкопленочные гетероструктуры сверхпроводник—ферромагнетик 101

Национальная академия наук Беларуси

The scientific-theoretical and information-methodical journal of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research

Issued since the 3rd quarter of 1997

VESTNIK OF THE FOUNDATION FOR FUNDAMENTAL RESEARCH

№ 1 [55], 2011

Registered in
The Ministry of Information
of the Republic of Belarus,
Certificate
№ 426 of May 29, 2009

The founder:
The Belarusian
Republican
Foundation
for Fundamental
Research

220072, Minsk,
Independence Av., 66;
ph. 284-07-42,
284-25-05

The publisher:
RUE «Publishing House
«Belaruskaya navuka»

EDITORIAL BOARD:
Editor-in-Chief
V. A. Orlovich

Deputy Editors-in-Chief
E. M. Babosov
V. I. Nedil'ko

Executive Secretary
N. N. Kostyukovich

Editorial board members:
V. F. Baginsky
N. N. Bambalov
A. V. Bildyukevich
I. V. Gaishun
M. I. Demchuk
V. S. Kamyshnikov
A. K. Karabanov
Yu. S. Kharin
L. V. Khotylyova
A. V. Kilchevsky
P. D. Kukharchik
A. V. Kukharev
A. I. Lesnikovich
A. A. Makhnach
A. G. Mrochek
M. I. Mushinsky
P. G. Nikitenko
V. N. Novikov
V. P. Parkhomenko
B. A. Plotnikov
V. I. Prokoshin
V. N. Shimov
V. I. Strazhev
L. M. Tomilchik
I. I. Tsyrkun
P. A. Vityaz

Minsk, 2011

Национальная академия наук Беларуси

CONTENTS

THE DAY OF BELARUSIAN SCIENCE

Congratulations by the President of the Republic of Belarus on the Day of Belarusian Science..... 5

INTERNATIONAL RELATIONS

Minutes of the 8th CNRS—NASB Joint Commission Proceeding 6

COMPETITIONS RESULTS

A list of the international scientific-technical projects «SCST—Lithuania»..... 8
Competition «BRFFR—CNRS-2011» of joint scientific projects of the BRFFR and the French National Center for Scientific Research..... 12
Competition «BRFFR—VAST-2011» of joint scientific projects of the BRFFR and the Vietnamese Academy of Science and Technology 15

BRFFR COMPETITIONS: NORMATIVE BASE

Terms of joint scientific projects competition «BRFFR—CNRS (PICS)-2012» of the BRFFR and the French National Center for Scientific Research 17
Competition on the Belarusian-French seminars in 2011—2012..... 23
Terms of joint scientific projects competition «BRFFR—VAST-2012» of the BRFFR and the Vietnamese Academy of Science and Technology 25

SCIENTIFIC PUBLICATIONS

Kabashnikova L. F., Abramchik L. M., Makarov V. N., Zenevich L. A., Cherlenok Ju. I., Kozlovskaja Z. Ja., Ustinov V. N., Savchenko G. E. Characteristics of a pigment apparatus of introduced cultivars of grape 30
Kazheunikau M. M., Ulyanau M. I., Subach S. M. Trajectory planning for industrial robotic manipulators using neural network 44
Sysa A. G., Kisselev P. A., Zhabinskii V. N., Khripach V. A. Structure-function relationship of an estimation antiproliferative activity of brassinosteroids concerning cancer cells MCF-7 56
Marenkin S. F., Fedorchenko I. V., Kochura A. V., Trukhan V. M., Lobanovsky L. S., Shoukavaya T. V. Magnetic properties of eutectic composition of InSb-MnSb system..... 64
Rupasova J. A., Garanovich I. M., Shpitalnaya T. M., Vassilevskaya T. I., Varavina N. P., Krinitskaya N. B. Peculiarities of accumulation of organic acids, terpenoids and carbohydrates in fruits of Cornus Mas. L. of Ukrainian selection introduced in conditions of Belarus..... 72
Borovoy A. A., Sharavarau H. A. Problems of the Chernobyl object Shelter 84
Lapitskaya O. V. Ecological validity of maturity of birch and aspen stands 92

SCIENTIFIC REVIEWS

Kushnir V. N., Prischepa S. L. Superconductor-Ferromagnet Thin Film Heterostructures..... 101

Национальная академия наук Беларуси

ДЕНЬ БЕЛОРУССКОЙ НАУКИ

Поздравление Президента Республики Беларусь с Днем белорусской науки

Деятелям науки, работникам научно-исследовательских институтов
и высших учебных заведений

Уважаемые друзья!

От всей души поздравляю вас с Днем белорусской науки.

Неукротимый дух познания и неустанный творческий поиск являются двигателем прогресса. Мы законно гордимся интеллектуальным потенциалом Беларуси, тем, что отечественные научные школы и коллективы, их разработки широко известны во всем мире. С помощью новых идей и их практического воплощения наша страна сможет выйти на принципиально новый уровень социально-экономического развития.

Сегодня белорусские ученые призваны быть наиболее инициативной и активной частью любой области деятельности, а их новаторские идеи — обогащать экономику и гуманитарную сферу, служить неуклонному росту качества жизни народа.

Уверен, что ваши самоотверженный труд и неиссякаемая энергия позволят обеспечить достижение выдающихся исследовательских результатов во имя процветания любимой Родины.

Желаю вам, дорогие друзья, крепкого здоровья, великих свершений и открытий, успехов, счастья и благополучия.

Президент Республики Беларусь **Александр Лукашенко**

Национальная академия наук Беларуси

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СВЯЗИ

ПРОТОКОЛ

8-го заседания Совместной комиссии НЦНИ и НАН Беларуси*

Париж, 26—27 января 2011 г.

Совместная комиссия Национального центра научных исследований (НЦНИ) и Национальной академии наук Беларуси (НАН Беларуси) при участии Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) в составе:

проф. В. А. Орловича и к. ф. н. В. В. Подкопаева с белорусской стороны,

к. н. М. Бонэн, проф. Э. Жиакобино, В. Робэн, К. Данилович, с французской стороны

обсудили все пункты повестки дня и согласились о нижеследующем:

I. В отношении предыдущей и текущей деятельности:

1. В рамках **1-го совместного конкурса на проведение двусторонних научных семинаров в 2009—2010 гг.** было проведено три (3) белорусско-французских семинара в области:

физиологии: «Методы анализа изображений для обнаружения и оценки патологических изменений мышцы», г. Париж, Франция, 29 сентября — 2 октября 2009 г.;

медицины: «Нейроваскулярные нарушения, вызванные условиями внешней среды: молекулярный, клеточный и функциональный подходы», г. Анжер, Франция, 10—13 марта 2010 г.;

технических наук: «Перспективы наноразмерной спинотроники и фотоэлектрической энергетики», г. Марсель, Франция, 16—20 ноября 2010 г.

2. В рамках **3-го совместного конкурса исследовательских проектов на 2009—2010 гг.** (НЦНИ—НАН Беларуси/БРФФИ) было успешно выполнено десять (10) проектов, по которым представлены отчеты от белорусских и французских руководителей проектов. Обеими Сторонами было обеспечено эффективное финансирование взаимных научных визитов.

3. В рамках конкурса БРФФИ—НЦНИ (PICS)-2009 из четырех проектов был выбран и одобрен к финансированию проект «Методы теории расписаний и теории графов для решения оптимизационных задач в приложении к логистике и цепям поставок» (2010—2012). Первый отчет был предоставлен

*Неофициальный перевод с английского языка

Национальная академия наук Беларуси

обеими сторонами. Цели первого периода были достигнуты в соответствии с рабочей программой.

II. В отношении будущей деятельности стороны договорились о нижеследующем:

1. В рамках **2-го совместного конкурса на проведение двусторонних научных семинаров в 2010—2011 гг.** один (1) белорусско-французский семинар (Дж.-Л. Лазари/В. Борисенко) «Перспективы нанотехнологий и наноматериалов в энергетике» был одобрен к финансированию и будет проходить в Минске 25—27 мая 2011 г.

2. В рамках **4-го совместного конкурса исследовательских проектов на 2011—2012 гг.** (НЦНИ—НАН Беларуси/БРФФИ) было подано двенадцать (12) проектов, которые прошли научную экспертизу с обеих сторон. Из этого списка десять (10) проектов были одобрены к реализации.

3. В рамках конкурса БРФФИ—НЦНИ (PICS)-2010 был подан один (1) проект, однако он не был принят к финансированию.

4. 1 февраля 2011 г. открыть **3-й совместный конкурс на проведение двусторонних научных семинаров в 2011—2012 гг.** Последний срок подачи заявок — 15 апреля 2011 г. Стороны утвердят окончательный список проектов 15 июня 2011 г.

5. Организовать **очередной совместный конкурс БРФФИ—НЦНИ (PICS) на 2012—2014 гг.** Начало подачи заявок — 1 февраля 2011 г., последний срок — 31 мая 2011 г.

6. Принять меры по информированию французских и белорусских ученых с целью активизации их участия во всех совместных конкурсах.

7. Рекомендовать руководителям новых двусторонних/многосторонних проектов привлекать в состав научных коллективов молодых ученых.

8. Проработать возможные механизмы информирования НАН Беларуси о создаваемых на базе НЦНИ консорциумах по подготовке проектных заявок на участие в РП7. НЦНИ будет приветствовать включение французских партнеров в заявки на конкурс «ERA—WIDE», подаваемые белорусскими коллективами.

9. Совместно с заинтересованными Сторонами проработать возможности организации совместной деятельности/программ по поддержке инновационной деятельности.

10. Следующее заседание Совместной комиссии НЦНИ—НАН Беларуси/БРФФИ провести в Минске предпочтительно не позднее января 2012 г. Точная дата будет определена позднее.

Настоящий Протокол подписан в двух экземплярах, причем оба являются оригиналами.

Париж, 27 января 2011 г.

За французскую сторону:
М. Бонэн

За белорусскую сторону:
В. Орлович
В. Подкопаев

Национальная академия наук Беларуси

ИТОГИ КОНКУРСОВ

ПЕРЕЧЕНЬ МЕЖДУНАРОДНЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ «ГКНТ—ЛИТВА»

Государственным комитетом по науке и технологиям Республики Беларусь (ГКНТ) в соответствии с Положением о международных научно-технических проектах, выполняемых в рамках международных договоров Республики Беларусь, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 13.08.2003 № 1065, статьей 81 Бюджетного кодекса Республики Беларусь, статьей 6 Закона Республики Беларусь «О республиканском бюджете на 2010 год» и приказом ГКНТ от 11.03.2010 № 80 утвержден перечень международных научно-технических проектов, выполняемых в рамках международных договоров Республики Беларусь. Приказом ГКНТ от 16.12.2010 № 343 Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований выделены объемы финансирования для выполнения 19 совместных проектов с учеными из организаций Литовской Республики. Ниже публикуется перечень финансируемых совместных научно-технических проектов, сгруппированных по секциям. По каждому проекту приводится следующая информация: фамилия и инициалы руководителя с белорусской стороны, шифр и название проекта, название организации-исполнителя с белорусской стороны, название организации-исполнителя с литовской стороны. В каждом из разделов перечня проекты перечислены в алфавитном порядке по фамилии руководителя. Продолжительность выполнения проектов — 2 года.

Секция биологических, медицинских и аграрных наук

1. БАЙЧОРОВ В. М. *Проект* Б11ЛИТ-002

Трансформация фауны ключевых водных экосистем трансграничного (Литва—Беларусь) озера Дрисвяты в связи с остановкой деятельности Игналинской АЭС, разработка рекомендаций для мониторинга, охраны и устойчивого использования.

Исполнители: Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Научный центр по изучению природы.

2. КРАСНЫЙ С. А. *Проект* Б11ЛИТ-016

Резервы снижения онкологической смертности и увеличения средней продолжительности жизни в Беларуси и Литве на модели онкоурологической патологии (рак почки, мочевого пузыря, предстательной железы).

Национальная академия наук Беларуси

Исполнители: РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Институт онкологии Вильнюсского университета.

3. КУЛАК А. В. *Проект* Б11ЛИТ-007

Пространственное распределение, существующие и потенциальные миграционные пути беспозвоночных и позвоночных животных в лесных экосистемах приграничных регионов Литвы и Беларуси.

Исполнители: Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Институт леса Центра аграрных и лесных наук Литвы.

4. МИХАЙЛОВА Р. В. *Проект* Б11ЛИТ-012

Биотопливные ячейки нового поколения на основе модифицированных редокс-ферментов.

Исполнители: Институт микробиологии НАН Беларуси, Центр нанотехнологии и материаловедения — NanoTechnas, Вильнюсский университет.

5. МОССЭ И. Б. *Проект* Б11ЛИТ-017

Взаимосвязь генетических, клинических и биохимических маркеров костного ремоделирования при тяжелом постменопаузальном остеопорозе.

Исполнители: Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Государственный научно-исследовательский институт «Центр инновационной медицины».

6. СМОЛЯКОВА Р. М. *Проект* Б11ЛИТ-015

Исследование инфицированности, установления генотипической принадлежности, вирусной нагрузки ВПЧ для выделения групп высокого риска у пациентов с предраковыми заболеваниями и раком слизистой полости рта, ротоглотки, гортани и шейки матки.

Исполнители: РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова Министерства здравоохранения Республики Беларусь, Институт онкологии Вильнюсского университета.

Секция гуманитарных наук

7. СКОК Н. В. *Проект* Г11ЛИТ-022

Сравнительная оценка энергетической безопасности Литвы и Беларуси на основе междисциплинарного подхода.

Исполнители: Белорусско-российский университет, Университет им. Витовта Великого.

8. СТАРИЧЕНОК В. Д. *Проект* Г11ЛИТ-011

Языки в белорусско-литовском пограничье: состояние, перспективы, региональное взаимодействие.

Исполнители: Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка, Вильнюсский педагогический университет.

Национальная академия наук Беларуси

9. ШАДУРСКИЙ В. Г. *Проект* Г11ЛИТ-029

Особенности национальной идентичности Литвы и Беларуси в контексте европейской интеграции: сходства и различия.

Исполнители: Белорусский государственный университет, Университет им. Витовта Великого.

Секция технических наук

10. ДЕВОЙНО О. Г. *Проект* Т11ЛИТ-025

Исследование закономерностей формирования структуры и свойств покрытий из металлических оксидов различного функционального назначения комбинированными методами лазерно-плазменной обработки.

Исполнители: Белорусский национальный технический университет, Литовский энергетический институт.

11. МИНЧЕНЯ В. Т. *Проект* Т11ЛИТ-030

Теоретическое и экспериментальное исследование свойств эластичных биологических материалов при воздействии механических колебаний высокой частоты.

Исполнители: Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», Каунасский технологический университет.

Секция физики, математики и информатики

12. ГОЛОВКО В. А. *Проект* Ф11ЛИТ-003

Двумерная навигация автономного мобильного робота в неизвестной динамической среде.

Исполнители: Брестский государственный технический университет, Каунасский технологический университет.

13. ИВАКИН Е. В. *Проект* Ф11ЛИТ-006

Исследование электронных и тепловых нестационарных процессов в CVD-алмазе различной морфологии оптическими методами.

Исполнители: Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Институт прикладных исследований Вильнюсского университета.

14. ЛУЦЕНКО Е. В. *Проект* Ф11ЛИТ-013

Исследование оптических свойств светоизлучающих нитридных гетероструктур, выращенных методом MOCVD.

Исполнители: Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Институт прикладных исследований Вильнюсского университета.

15. МАКАРЕНКО Л. Ф. *Проект* Ф11ЛИТ-018

Использование легирования германием для увеличения радиационной стойкости приборов на основе кремния.

Исполнители: НИИ прикладных проблем математики и информатики БГУ, Вильнюсский университет.

Национальная академия наук Беларуси

16. ОДРИНСКИЙ А. П. *Проект* Ф11ЛИТ-008

Изучение отдельных нанослоев слоистых полупроводниковых материалов методами индуцированного поглощения свободными носителями и релаксации фотопроводимости.

Исполнители: Институт технической акустики НАН Беларуси, Вильнюсский университет.

17. ОРЛОВИЧ В. А. *Проект* Ф11ЛИТ-026

Многочастотные импульсные диодно накачиваемые миниатюрные лазеры с ВКР-преобразованием частоты и длительности импульсов.

Исполнители: Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Центр физических наук и технологий.

18. ТАРАСЕНКО Н. В. *Проект* Ф11ЛИТ-009

Разработка лазерных методов синтеза и онлайн характеризации наночастиц металлов и их оксидов в жидкостях.

Исполнители: Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Центр физических наук и технологий.

Секция химии и наук о Земле

19. ВРУБЛЕВСКИЙ И. А. *Проект* Х11ЛИТ-027

Электрохимический синтез, модификация и исследование фотоэлектрохимических свойств пленок нанопористого оксида железа и стали для топливных элементов.

Исполнители: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Центр физических наук и технологий.

Национальная академия наук Беларуси

КОНКУРС СОВМЕСТНЫХ НАУЧНЫХ ПРОЕКТОВ БЕЛОРУССКОГО РЕСПУБЛИКАНСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФРАНЦИИ «БРФФИ—НЦНИ-2011»

В апреле 2010 г. Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (БРФФИ) и Национальным центром научных исследований Франции (НЦНИ) в соответствии с заключенным между ними Соглашением был объявлен конкурс совместных научных проектов «БРФФИ—НЦНИ-2011», на который поступило 12 заявок. По результатам независимой экспертизы и конкурсного отбора поданных заявок Совместной комиссией НЦНИ, НАН Беларуси и БРФФИ принято решение о финансировании 10 проектов. Ниже публикуется перечень финансируемых совместных научных проектов «БРФФИ—НЦНИ-2011», сгруппированных по 3 секциям. По каждому проекту приводится следующая информация: фамилия и инициалы руководителя с белорусской стороны, шифр и название проекта, название организации-исполнителя с белорусской стороны, название организации-исполнителя с французской стороны. В каждом из разделов проекты перечислены в алфавитном порядке по фамилии руководителя. Продолжительность выполнения проектов — 2 года.

Секция биологических, медицинских и аграрных наук

1. ЗОРИН В. П. *Проект* Б11Ф-004

Фотоактивные обычные и стерически стабилизированные липидные наночастицы для фотодинамической терапии.

Исполнители: Белорусский государственный университет, Центр исследований и автоматизации Нанси (CRAN), Университет Нанси, CNRS, Центр Алексис Вотран.

Секция гуманитарных наук

2. ПОДКОПАЕВ В. В. *Проект* Г11Ф-010

Влияние французского Просвещения на эволюцию социокультурной сферы Беларуси.

Исполнители: Институт философии НАН Беларуси, Институт исследований ренессанса, классицизма и просвещения Университета Монпелье III Поль-Валери.

Национальная академия наук Беларуси

3. ТИКОВЕНКО А. Г. *Проект* Г11Ф-006

Правовое обеспечение эффективности конституционного правосудия в Республике Беларусь и Франции в контексте европейской интеграции.

Исполнители: Белорусский государственный экономический университет, Научный центр сравнительных исследований Конституции, свобод и государств Университета Монтескье — Бордо IV.

Секция физики, математики и информатики

4. АРАБЕЙ С. М. *Проект* Ф11Ф-001

Влияние матричного окружения и молекулярной структуры порфиринов на их стимулированное излучение при низкой температуре.

Исполнители: Белорусский государственный аграрный технический университет, Орсэйский Институт молекулярных наук.

5. БОРИСЕНКО В. Е. *Проект* Ф11Ф-011

Электронные и оптические свойства полупроводниковых соединений $Cu_2(Si,Sn,Ge)S_3$ в качестве CIGS-замещающих материалов для фотоэлектрических преобразователей энергии и тройных соединений $(Mg,Zn)(Si,Ge,Sn)Sb_2$ для фотодетекторов дальнего ИК-диапазона.

Исполнители: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Междисциплинарный центр нанотехнологий Марселя — НЦНИ.

6. КСЕНЕВИЧ В. К. *Проект* Ф11Ф-007

Формирование и магнитотранспортные свойства пленок диоксида олова, легированных ферромагнитными металлами.

Исполнители: Белорусский государственный университет, Национальная лаборатория импульсных магнитных полей.

7. САЙКО А. П. *Проект* Ф11Ф-009

Линейная и нелинейная динамика колебательных мод в кристаллических и молекулярных средах при когерентном терагерцовом импульсном возбуждении.

Исполнители: Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Центр молекулярной физики, оптики и электромагнетизма, Университет Бордо-1.

8. СИМОНЧИК Л. В. *Проект* Ф11Ф-002

Несамостоятельные тлеющие разряды: моделирование и применение в электромагнитных полосовых устройствах.

Исполнители: Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Лаборатория плазмы и преобразования энергии — НЦНИ.

Национальная академия наук Беларуси

9. СНЕЖКО Э. В. *Проект* Ф11Ф-005

Количественная оценка нервно-мышечных нарушений на основе текстурного анализа изображений ядерного магнитного резонанса.

Исполнители: Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Университет П. и М. Кюри.

10. ЧАЙКОВСКАЯ Л. И. *Проект Ф11Ф-008*

Разработка эффективных методов обработки данных для объединенных радиометрических и лидарных систем.

Исполнители: Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Лаборатория оптики атмосферы, Научно-технологический университет г. Лилль.

Национальная академия наук Беларуси

КОНКУРС СОВМЕСТНЫХ НАУЧНЫХ ПРОЕКТОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕЛОРУССКОГО РЕСПУБЛИКАНСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЬЕТНАМСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК И ТЕХНОЛОГИЙ «БРФФИ—ВАНТ-2011»

В феврале 2010 г. был объявлен конкурс совместных научных проектов «БРФФИ—ВАНТ-2011» с целью поддержки совместных фундаментальных научных исследований в областях, представляющих интерес для Республики Беларусь и Социалистической Республики Вьетнам, на который поступило 11 заявок. По результатам экспертизы принято совместное решение о финансировании 4 проектов. Ниже публикуется перечень финансируемых совместных научных проектов «БРФФИ—ВАНТ-2011», сгруппированных по 2 секциям. По каждому проекту приводится следующая информация: фамилия и инициалы руководителя с белорусской стороны, шифр и название проекта, название организации-исполнителя с белорусской стороны, название организации-исполнителя с вьетнамской стороны. В каждом из разделов проекты перечислены в алфавитном порядке по фамилии руководителя. Продолжительность выполнения проектов — 2 года.

Секция биологических, медицинских и аграрных наук

1. БАРАНОВА Л. А. *Проект* Б11В-010

Биологические эффекты наночастиц серебра.

Исполнители: Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, Институт технологии окружающей среды ВАНТ.

Секция физики, математики и информатики

2. ПОКЛОНСКИЙ Н. А. *Проект* Ф11В-001

Локальная симметрия и индуктивность углеродных низкоразмерных систем.

Исполнители: Белорусский государственный университет, Институт физики и электроники ВАНТ.

3. ЧИЖИК С. А. *Проект* Ф11В-011

Разработка динамического режима электромеханического взаимодействия острие-образец в сканирующей зондовой микроскопии для характеризации наноструктур.

Исполнители: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Институт прикладной физики и научного инструмента ВАНТ.

Национальная академия наук Беларуси

4. ШИЛИН Л. Ю. *Проект* Ф11В-005

Разработка методов анализа и синтеза сложных динамических систем и устройств на основе современных информационных технологий для автоматизации технологических процессов в горнодобывающей промышленности.

Исполнители: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Институт информационных технологий ВАНТ.

Раздел подготовлен главным специалистом
отдела зарубежных связей
и информационного обеспечения
Н. Н. Половинко

Национальная академия наук Беларуси

КОНКУРСЫ БРФФИ: НОРМАТИВНАЯ БАЗА

УТВЕРЖДЕНО
решением бюро Научного совета БРФФИ
от 01 февраля 2011 г.
протокол № 2

УСЛОВИЯ

конкурса совместных научных проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национального центра научных исследований Франции «БРФФИ—НЦНИ(PICS)-2012»

Общие положения

1. Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (БРФФИ) и Национальный центр научных исследований Франции (НЦНИ) объявляют конкурс совместных научных проектов в рамках Международных программ научного сотрудничества (PICS) и в соответствии с заключенным между ними Соглашением о научном сотрудничестве. Целью конкурса является финансовая поддержка творческих научных коллективов, занимающихся решением актуальных проблем, представляющих наибольший интерес для сторон и соответствующих приоритетным направлениям фундаментальных научных исследований.

2. Конкурс проводится в следующих областях фундаментальных исследований:

— физика, математика и информатика (01);
— технические науки (02);
— химия и науки о Земле (03);
— биологические, медицинские и аграрные науки (04);
— гуманитарные науки (05).

3. В конкурсе могут участвовать французские исследователи, работающие в лабораториях НЦНИ, и белорусские исследователи, работающие в организациях, осуществляющих фундаментальные исследования. Оба коллектива должны иметь опыт сотрудничества и совместно опубликованные научные статьи.

4. Заявки на конкурс подаются одновременно: белорусскими учеными — в БРФФИ, французскими — в НЦНИ в соответствии с установленными в них формами. Заявки представляются на русском (белорусском) и английском

Национальная академия наук Беларуси

языках. Состав участников, наименование проекта, ключевые слова, основные формулировки в обоих вариантах должны быть идентичными, а программа исследований — взаимно согласованной по срокам и содержанию. В программе исследований должно быть четко отражено, какие задачи выполняет белорусская сторона, какие — французская, а какие — выполняются совместно.

Одно и то же лицо с белорусской стороны (в качестве как руководителя, так и исполнителя) может одновременно входить в состав исполнителей не более трех исследовательских проектов, включая конкурсы 2011 г.: одного общереспубликанского («Наука», «Наука М», «Ученый»), одного целевого республиканского («БРФФИ—Брест», «БРФФИ—МСХП» и др.) и одного международного, включая конкурс «Наука МС», или одного республиканского любого вида и двух международных, включая конкурс «Наука МС». Проекты, которые заканчиваются в 1 квартале 2012 г., не учитываются.

При этом ученый может быть руководителем не более двух проектов, а в рамках одного вида конкурсов участвовать (в качестве как руководителя, так и исполнителя) не более чем в одном проекте.

Если при подаче заявки на конкурс 2012 г. обнаружится нарушение любого из вышеперечисленных ограничений, то эта заявка не будет допущена к конкурсу.

Экспертизу проектов с белорусской стороны выполняет БРФФИ, с французской стороны — НЦНИ. Совместная комиссия дает окончательную оценку и проводит отбор совместных проектов, исходя из их научной ценности и устанавливаемого ежегодного бюджета финансирования.

5. По результатам конкурса осуществляется целевое финансирование проектов фундаментальных исследований. Каждая страна финансирует свою часть проекта. Финансирование работ белорусских ученых осуществляется на основе договоров между Фондом и организациями — исполнителями проектов за счет средств республиканского бюджета. Организации-исполнители белорусской и французской сторон после успешного прохождения конкурса при необходимости заключают между собой Соглашение о защите и использовании прав интеллектуальной собственности (типовое соглашение находится на сайте БРФФИ). Приветствуется долевое участие в финансировании работ организаций — исполнителей проектов, а также заказчиков, заинтересованных в проведении фундаментальных исследований по конкретным научным направлениям.

6. Необходимым условием предоставления грантов является обязательство ученых сделать результаты совместных исследований общественным достоянием с опубликованием их в научных изданиях и указанием о поддержке Фонда и НЦНИ. В годовом и итоговом отчетах по проекту должны быть отражены в отдельной главе результаты, полученные учеными французской стороны.

7. Гранты Фонда, по которым исполнители не заключили без уважительных причин договоры в течение двух месяцев со дня утверждения итогов конкурса, отменяются.

Национальная академия наук Беларуси

Требования к проектам, представляемым на конкурс

8. На конкурс принимаются проекты, представляющие взаимный интерес и соответствующие приоритетным направлениям фундаментальных научных исследований Республики Беларусь, способные внести существенный вклад в расширение и углубление научных знаний, отличающиеся новизной в постановке и методах проведения исследований и имеющие большую научную и практическую значимость.

9. При рассмотрении проектов оцениваются:

— соответствие целей, задач и тематики проектов приоритетным направлениям фундаментальных научных исследований Республики Беларусь согласно перечню, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585, а также мировым тенденциям развития науки;

— актуальность тематики;

— наличие четко сформулированной и обоснованной идеи (гипотезы) авторов проекта, степень ее оригинальности;

— научная значимость запланированных результатов и возможность их практической реализации в будущем:

в виде экспериментальных образцов, прошедших испытания в производственных условиях, опытных образцов, опытных партий или промышленных серий в различного вида производствах;

при выполнении заданий государственных научно-технических программ или программ Союзного государства Беларуси и России;

в издании учебников и других учебных материалов в системе образования;

в патентах на изобретения, подтверждающих предпосылку для практической реализации, в том числе и на производстве;

в заключении контрактов с зарубежными организациями на выполнение разработок по результатам фундаментальных исследований и выполнении международных проектов;

в использовании результатов НИР в документах государственных органов Республики Беларусь;

— соответствие программы исследования целям и задачам проекта, а также возможность достижения запланированных конечных результатов;

— научная квалификация руководителя проекта и всего научного коллектива;

— наличие необходимой материально-технической базы;

— результативность предыдущих проектов по Фонду, выполненных под руководством данного ученого.

Преимущество отдается проектам, направленным на решение актуальных научных проблем по приоритетным направлениям научно-технического и социально-экономического развития Республики Беларусь, а также проектам, в состав исполнителей которых входят представители региональных организаций и/или отраслевых НИИ и КБ.

Руководитель проекта должен иметь не менее трех статей в авторитетных научных журналах и/или патентов или монографию по научному направлению проекта, опубликованных в течение последних трех лет, а исполнители

Национальная академия наук Беларуси

(в том числе и руководитель) проекта — не менее одной научной статьи, опубликованной в рецензируемом научном журнале совместно с французскими исследователями, участвующими в выполнении предлагаемого проекта.

10. Срок выполнения проекта, как правило, не должен превышать трех лет с однократной возможностью последующего конкурсного продления.

Дублирование плановой тематики не допускается.

Если в процессе конкурса исполнители получили по заявленной теме финансирование из другого источника, то они обязаны в месячный срок поставить Фонд об этом в известность. В противном случае заявка будет снята с конкурса (в случае получения гранта он будет отменен), а исполнители — лишены права участвовать во всех конкурсах Фонда в течение 5 лет.

Проекты, участвовавшие в предыдущих конкурсах Фонда, к участию в конкурсе «БРФФИ—НЦНИ(PICS)-2012» не допускаются.

11. Заявка на конкурс вносится по установленным формам в трех отдельно скрепленных экземплярах. В обязательном порядке представляется также электронный вариант заявочных материалов, сформированных в соответствии с инструкцией по составлению электронного варианта заявки. Заявитель несет ответственность, вплоть до снятия проекта с конкурса, за соответствие электронного варианта заявки заявке на бумажном носителе.

Материалы заявки должны включать:

— титульный лист заявки (форма П1pics);

— аннотацию (форма П2pics);

— обоснование проекта (форма П3pics), в котором обязательно дается обоснование целесообразности проведения совместных исследований с указанием возможностей, которые могут быть предоставлены французским партнером белорусской стороне (использование оборудования, реактивов, материалов, научной литературы, освоение методик и др.), а белорусским партнером — французской стороне; также приводится план работы партнера;

— научную биографию руководителя проекта с белорусской стороны (форма П4pics), а в английской версии — и с французской стороны;

— калькуляцию сметной стоимости проекта с белорусской стороны (форма П5pics) с расшифровкой статей затрат. Количество штатных единиц не должно превышать пяти. Зарубежные командировки планируются только в организацию, где работает зарубежный партнер, затраты не должны превышать 20 % от плановой себестоимости проекта. Приобретение оборудования не финансируется. Если в процессе выполнения проекта возникнет острая необходимость в приобретении научного оборудования, решение по данному вопросу принимается бюро Научного совета Фонда по ходатайству организации-исполнителя с подробным обоснованием такой необходимости. При этом расходы на эти цели не должны превышать 10 % от плановой стоимости проекта. При наличии организаций-соисполнителей с белорусской стороны представляется также лист согласования расходов, ограничение на количество штатных единиц в этом случае сохраняется;

— перечень научных трудов руководителя проекта с белорусской стороны по научному направлению проекта (до 10 наименований), опубликованных в течение последних трех лет на дату подачи заявки (форма П6pics) — в русской версии.

Национальная академия наук Беларуси

При представлении заявок на исследования, требующие использования дорогостоящей инфраструктуры (сложных приборов коллективного пользования и др.) и дорогостоящих образцов, добытых в рамках других программ и проектов (образцов горных пород, биологических образцов и препаратов и др.), авторам необходимо приложить письменное согласие руководителей соответствующих организаций на доступ к такой инфраструктуре и образцам.

Авторам предоставляется право указывать нежелательных экспертов (но не организации) по своему проекту. Информация об этом приводится на отдельном листе, который прилагается к материалам заявки.

Фонд воздерживается от рекомендаций по изменению или дополнению формулировок в материалах заявок, представленных на конкурс, по существу их содержания. По принятым к финансированию проектам секции Научного совета Фонда имеют право вносить предложения по изменению названий проектов и уточнению отдельных их положений, которые обязательны к исполнению руководителями проектов на стадии подготовки договоров на выполнение НИР.

К материалам заявки прилагаются в двух экземплярах копии опубликованных научных трудов по тематике проекта (до 5 наименований), которые скрепляются со 2-м и 3-м экземплярами заявки. Кроме того, представляются копии статей, опубликованных совместно с французскими участниками проекта. В случае если совместных научных трудов много, представляются копии основных из них и дополнительно прилагается список всех совместных публикаций.

Сроки и условия участия в конкурсе

12. Заявки на конкурс в БРФФИ принимаются по 31 мая 2011 г. (представление заявок в НЦНИ для предварительного отбора французской стороной — по 31 марта 2011 г.). Для иногородних дата определяется по штемпелю на почтовом отправлении.

Информацию о НЦНИ можно найти на сайте http://www.cnrs.fr.

К конкурсу не допускаются заявки, оформленные с отклонениями от правил или представленные после объявленного срока. Не допускаются последующие замены страниц и изменения в тексте поданного проекта.

Информация о поступлении в Фонд и регистрации заявок сообщается авторам по их запросу.

13. Фонд сообщает только окончательные результаты конкурса, информируя руководителей проектов и публикуя списки поддержанных проектов в журнале «Вестник Фонда фундаментальных исследований» и на сайте Фонда.

Апелляции на решения Научного совета и рабочих органов Фонда не принимаются и не рассматриваются.

Информация о ходе рассмотрения заявок, включая рецензии на них, является конфиденциальной.

Представленные на конкурс материалы не возвращаются.

14. Материалы направляются в адрес исполнительной дирекции Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований:

220072, г. Минск, пр. Независимости, 66, к. 101,

Национальная академия наук Беларуси

тел. для справок: код города: +37517
294-92-16 (физика, математика и информатика),
284-27-22 (технические науки),
294-93-36 (химия и науки о Земле),
284-06-38 (гуманитарные науки),
294-92-17 (отдел международных связей; биологические, медицинские и аграрные науки),
294-93-35 (бухгалтерия); факс 284-08-97.

Национальная академия наук Беларуси

УТВЕРЖДЕНО
решением бюро Научного совета БРФФИ
от 01 февраля 2011 г.
протокол № 2

Конкурс на проведение белорусско-французских семинаров в 2011—2012 гг.

1. Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (БРФФИ) в рамках Соглашения с Национальным центром научных исследований (НЦНИ) Франции объявляет конкурс на организацию в 2011—2012 гг. двусторонних научных семинаров, проводимых во Франции и Беларуси, по приоритетным и представляющим взаимный интерес научным направлениям обеих стран. Целью конкурса является укрепление и развитие связей между белорусскими и французскими учеными.

2. Период проведения семинаров — июнь 2011 г. — июнь 2012 г.

3. В конкурсе могут участвовать организации НЦНИ и белорусские организации, осуществляющие фундаментальные исследования. Общее количество участников семинара не должно превышать 20 человек, при этом до 10 человек — от направляющей стороны и до 10 человек — от принимающей стороны. Обязательным является принадлежность участников семинара от каждой стороны к различным научным организациям (по крайней мере, к двум). Общая продолжительность семинара — не более трех дней.

4. Согласованные заявки по установленным формам на участие в конкурсе представляются белорусским соруководителем семинара — в БРФФИ, французским соруководителем — в НЦНИ до 15 апреля 2011 г.

5. Допущенные к конкурсу заявки проходят параллельно независимую экспертизу: заявки французских ученых — в НЦНИ, заявки белорусских ученых — в БРФФИ. Рассмотрение заявок осуществляется каждой из сторон самостоятельно в соответствии с собственными правилами.

Информация о прохождении экспертизы строго конфиденциальна.

Окончательное решение о поддержке семинаров принимается сторонами совместно.

6. Финансирование семинара осуществляется по принципу: принимающая сторона оплачивает все расходы, связанные с проведением семинара, направляющая сторона оплачивает транспортные расходы до места проведения семинара и обратно.

Для получения финансирования БРФФИ белорусский соруководитель семинара, поддержанного по итогам конкурса, обязан:

— если семинар проводится в Беларуси, подать в БРФФИ заявку, оформленную в соответствии с условиями конкурса БРФФИ на соискание грантов финансовой поддержки республиканских и международных научных мероприятий на 2011 г.;

— если семинар проводится во Франции, организовать подачу индивидуальных заявок от белорусских участников семинара, оформленных в соответствии с условиями конкурса БРФФИ на соискание грантов финансовой поддержки участия ученых в зарубежных научных мероприятиях на 2011 г.

Национальная академия наук Беларуси

7. Заявка вносится по установленным формам в двух экземплярах на русском и одном экземпляре на английском языках.

В обязательном порядке представляется также электронный вариант заявочных материалов, сформированных в соответствии с инструкцией по составлению электронного варианта заявки.

Материалы заявки включают:

— форму 1 (титульный лист и калькуляцию сметной стоимости);

— форму 2 (обоснование проведения семинара).

Материалы направляются в адрес исполнительной дирекции Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований:

220072, г. Минск, пр. Независимости, 66, к. 101,

тел. для справок: код города: +37517

294-92-16 (физика, математика и информатика),

284-27-22 (технические науки),

294-93-36 (химия и науки о Земле),

284-06-38 (гуманитарные науки),

294-92-17 (отдел международных связей; биологические, медицинские и аграрные науки),

294-93-35 (бухгалтерия); факс 284-08-97.

Национальная академия наук Беларуси

УТВЕРЖДЕНО
решением бюро Научного совета БРФФИ
от 01 февраля 2011 г.
протокол № 2

УСЛОВИЯ

конкурса совместных научных проектов фундаментальных исследований Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий «БРФФИ—ВАНТ-2012»

Общие положения

1. Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (БРФФИ) и Вьетнамская академия наук и технологий (ВАНТ) в соответствии с заключенным между ними Соглашением о сотрудничестве объявляют конкурс совместных научных проектов фундаментальных исследований с целью консолидации усилий обеих организаций для финансирования актуальных научных исследований, выполняемых совместно учеными Республики Беларусь и Социалистической Республики Вьетнам, по приоритетным для обеих сторон направлениям фундаментальных научных исследований.

2. Конкурс проводится по следующим научным направлениям:
— лазерная физика, лазерно-оптическая техника и технологии;
— химия новых материалов;
— физика твердого тела и полупроводников;
— атомная энергетика;
— нанотехнологии и производство наноматериалов;
— информационные технологии;
— биотехнологии.

3. Заявки на конкурс подаются одновременно в обе организации в соответствии с установленными в них формами, при этом белорусские — в БРФФИ, вьетнамские — в ВАНТ.

В БРФФИ принимаются заявки научных коллективов и отдельных ученых из организаций Республики Беларусь. Принимаются заявки белорусских ученых, постоянно проживающих и работающих на территории Республики Беларусь. Заявки представляются на русском (белорусском) и английском языках.

Состав участников, наименование проекта, ключевые слова, основные формулировки в обоих вариантах заявки должны быть идентичными, а программа исследований — взаимно согласованной по срокам и содержанию. В программе исследований должно быть четко отражено, какие задачи выполняет белорусская сторона, какие — вьетнамская, а какие — выполняются совместно.

Конкурсный отбор проектов осуществляется в установленном порядке.

Одно и то же лицо с белорусской стороны (в качестве как руководителя, так и исполнителя) может одновременно входить в состав исполнителей не более трех исследовательских проектов, включая конкурсы 2011 г.: одного об-

Национальная академия наук Беларуси

щереспубликанского («Наука», «Наука М», «Ученый»), одного целевого республиканского («БРФФИ—Брест», «БРФФИ—МСХП» и др.) и одного международного, включая конкурс «Наука МС», или одного республиканского любого вида и двух международных, включая конкурс «Наука МС».

Проекты, которые заканчиваются в 1 квартале 2012 г., не учитываются.

При этом ученый может быть руководителем не более двух проектов, а в рамках одного вида конкурсов участвовать (в качестве как руководителя, так и исполнителя) не более чем в одном проекте.

Если при подаче заявки на конкурс 2012 г. обнаружится нарушение любого из вышеперечисленных ограничений, то эта заявка не будет допущена к конкурсу.

4. По результатам конкурса осуществляется целевое финансирование проектов, прошедших отбор в обеих организациях, при этом каждая сторона финансирует свою часть проекта. Финансирование работ белорусских ученых осуществляется на основе договоров между Фондом и организациями — исполнителями проектов за счет средств республиканского бюджета. После открытия финансирования организации-исполнители белорусской и вьетнамской сторон в случае необходимости заключают между собой Соглашение о защите и использовании прав интеллектуальной собственности (типовое соглашение находится в формах заявочных материалов).

Приветствуется долевое участие в финансировании работ организаций — исполнителей проектов, а также заказчиков, заинтересованных в проведении фундаментальных исследований по конкретным научным направлениям.

Условия финансирования вьетнамских исполнителей проектов определяются правилами ВАНТ.

5. Необходимым условием предоставления грантов является обязательство ученых сделать результаты исследований общественным достоянием с опубликованием их в научных изданиях и с указанием о поддержке БРФФИ и ВАНТ.

В итоговом отчете по проекту, представляемом белорусскими исполнителями в БРФФИ, кратко должны быть отражены в отдельной главе результаты, полученные учеными вьетнамской стороны и (или) совместно.

6. Гранты, по которым исполнители не заключили без уважительных причин договоры в течение двух месяцев со дня утверждения итогов конкурса, отменяются.

Требования к проектам, представляемым на конкурс в БРФФИ

7. На конкурс представляются проекты по приоритетным направлениям фундаментальных исследований Республики Беларусь, способные внести существенный вклад в расширение и углубление научных знаний, отличающиеся новизной в постановке и методах проведения исследований и имеющие большую научную и практическую значимость.

8. При рассмотрении проектов оцениваются:

— актуальность тематики;

— соответствие целей, задач и тематики проектов приоритетным направлениям фундаментальных научных исследований Республики Беларусь согласно

Национальная академия наук Беларуси

перечню, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585, а также мировым тенденциям развития науки;

— наличие четко сформулированной и обоснованной идеи (гипотезы) проекта, степень ее оригинальности;

— научная значимость запланированных результатов и возможность их практической реализации в будущем:

в виде экспериментальных или опытных образцов, опытных партий или промышленных серий в различного вида производствах;

при выполнении заданий государственных научно-технических программ или программ Союзного государства Беларуси и России;

в издании учебников и других учебных материалов в системе образования;

в патентах на изобретения, подтверждающих предпосылку для практической реализации, в том числе и на производстве;

в заключении контрактов с зарубежными организациями на выполнение разработок по результатам фундаментальных исследований и выполнении международных проектов;

в использовании результатов НИР в материалах государственных органов Республики Беларусь;

— соответствие программы исследования целям и задачам проекта, а также возможность достижения запланированных конечных результатов;

— научная квалификация руководителя проекта и всего научного коллектива;

— наличие необходимой материально-технической базы;

— результативность предыдущих проектов по Фонду, выполненных под руководством данного ученого.

Преимущество отдается проектам, направленным на решение актуальных научных проблем по приоритетным направлениям научно-технического и социально-экономического развития Республики Беларусь, а также проектам, в состав исполнителей которых входят представители региональных организаций и/или отраслевых НИИ и КБ.

Руководитель проекта должен иметь не менее трех статей в авторитетных научных журналах и/или патентов или монографию по научному направлению проекта, опубликованных в течение последних трех лет.

9. Срок выполнения проекта, как правило, не должен превышать двух лет.

Дублирование плановой тематики не допускается.

Если в процессе конкурса исполнители получили по заявленной теме финансирование из другого источника, то они обязаны в месячный срок поставить Фонд об этом в известность. В противном случае заявка будет снята с конкурса (в случае получения гранта он будет отменен), а исполнители лишены права участвовать во всех конкурсах Фонда в течение 5 лет.

Проекты, участвовавшие в предыдущих конкурсах Фонда, к участию в конкурсе «БРФФИ—ВАНТ-2012» не допускаются.

10. Заявка на конкурс вносится по установленным формам в трех отдельно скрепленных экземплярах. В обязательном порядке представляется также электронный вариант заявочных материалов, сформированных в соответствии с инструкцией по составлению электронного варианта заявки. Заяви-

Национальная академия наук Беларуси

тель несет ответственность, вплоть до снятия проекта с конкурса, за соответствие электронного варианта заявки заявке на бумажном носителе.

Материалы заявки должны включать:

— титульный лист заявки (форма П1В);

— аннотацию (форма П2В);

— обоснование проекта (форма П3В), в котором обязательно приводится аргументация целесообразности проведения совместных исследований с указанием возможностей, которые могут быть предоставлены вьетнамским партнером белорусской стороне (использование оборудования, реактивов, материалов, научной литературы, освоение методик и др.), а белорусским партнером — вьетнамской стороне, также приводится план работы партнера;

— научные биографии руководителей проекта (форма П4В);

— калькуляцию сметной стоимости проекта с белорусской стороны (форма П5В) с расшифровкой статей затрат. Количество штатных единиц не должно превышать пяти. Зарубежные командировки планируются только в организацию, где работает зарубежный партнер, затраты не должны превышать 20 % от плановой себестоимости проекта. Приобретение оборудования не финансируется. Если в процессе выполнения проекта возникнет острая необходимость в приобретении научного оборудования, решение по данному вопросу принимается бюро Научного совета Фонда по ходатайству организации-исполнителя с подробным обоснованием такой необходимости. При этом расходы на эти цели не должны превышать 10 % от плановой стоимости проекта. При наличии организаций-соисполнителей с белорусской стороны представляется также лист согласования расходов, ограничение на количество штатных единиц в этом случае сохраняется;

— перечень научных трудов руководителя проекта по научному направлению проекта (до 10 наименований), опубликованных в течение последних трех лет на дату подачи заявки (форма П6В).

При представлении заявок на исследования, требующие использования дорогостоящей инфраструктуры (сложных приборов коллективного пользования и др.) и дорогостоящих образцов, добытых в рамках других программ и проектов (образцов горных пород, биологических образцов и препаратов и др.), авторам необходимо приложить письменное согласие руководителей соответствующих организаций на доступ к такой инфраструктуре и образцам.

Авторам предоставляется право указывать нежелательных экспертов (но не организации) по своему проекту. Информация об этом приводится на отдельном листе, который прилагается к материалам заявки.

Фонд воздерживается от рекомендаций по изменению или дополнению формулировок в материалах заявок, представленных на конкурс, по существу их содержания. По принятым к финансированию проектам секции Научного совета Фонда имеют право вносить предложения по изменению названий проектов и уточнению отдельных их положений, которые обязательны к исполнению руководителями проектов на стадии подготовки договоров на выполнение НИР.

К материалам заявки прилагаются в двух экземплярах копии опубликованных научных трудов по тематике проекта (до 5 наименований), которые скрепляются со 2-м и 3-м экземплярами заявки.

Национальная академия наук Беларуси

Сроки и условия участия в конкурсе

11. Заявки на конкурс в БРФФИ представляются по 16 мая 2011 г. Для иногородних дата определяется по штемпелю на почтовом отправлении.

К конкурсу не допускаются заявки, оформленные с отклонениями от правил или представленные после объявленного срока. Не допускаются последующие замены страниц и изменения в тексте поданного проекта.

Информация о поступлении в Фонд и регистрации заявок выдается авторам по их запросу.

12. Фонд сообщает только окончательные результаты конкурса, информируя руководителей проектов в течение месяца после его завершения и публикуя списки поддержанных проектов в журнале «Вестник Фонда фундаментальных исследований» и на Web-сайте Фонда.

Апелляции на решения Научного совета и рабочих органов Фонда не принимаются и не рассматриваются.

Информация о ходе рассмотрения заявок, включая рецензии на них, является конфиденциальной.

Представленные на конкурс материалы не возвращаются.

13. Материалы белорусских ученых на конкурс направляются в исполнительную дирекцию Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по адресу:

220072, г. Минск, пр. Независимости, 66, к. 101,

тел. для справок: код города: +37517

294-92-16 (физика, математика и информатика),

284-27-22 (технические науки),

294-93-36 (химия и науки о Земле),

294-92-17 (отдел международных связей; биологические, медицинские и аграрные науки),

294-93-35 (бухгалтерия); факс 284-08-97.

Национальная академия наук Беларуси

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

УДК 581.132.1.017.3:633.1

Л. Ф. КАБАШНИКОВА[1], Л. М. АБРАМЧИК[1], В. Н. МАКАРОВ[1], Л. А. ЗЕНЕВИЧ[1], Ю. И. ЧЕРЛЕНОК[1], З. Я. КОЗЛОВСКАЯ[2], В. Н. УСТИНОВ[2], Г. Е. САВЧЕНКО[1]

ХАРАКТЕРИСТИКА ПИГМЕНТНОГО АППАРАТА ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ СОРТОВ ВИНОГРАДА

[1]Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси
[2]Институт плодоводства

(Поступила в редакцию 28.12.2010)

Проанализирована динамика изменения содержания фотосинтетических пигментов в листьях средних ярусов 20 интродуцированных в Республике Беларусь сортов винограда в процессе вегетационного периода 2009 г. Выявлена существенная межсортовая вариабельность содержания хлорофиллов и каротиноидов (от 9,5 до 33 мкг/см^2 для суммы хлорофиллов a и b и от 2,3 до 6,5 мкг/см^2 для суммы каротиноидов). Обнаружен ряд особенностей пигментного аппарата винограда по сравнению с однодольными и двудольными растениями, произрастающими в климатической зоне Республики Беларусь в условиях открытого грунта: 1) более низкое содержание фотосинтетических пигментов; 2) относительно высокое содержание светособирающей системы на протяжении всего вегетационного периода (отношение хлорофиллов a и b ниже 2,6 у преобладающего количества сортов), характерное для теневыносливых растений; 3) низкое содержание внепластидных пигментов антоцианов; 4) высокое содержание малонового диальдегида, характеризующего уровень перекисного окисления липидов. Обсуждается возможность использования совокупности биохимических параметров для прогнозирования стрессоустойчивости винограда.

Введение. Опыт работы по интродукции винограда (*Vitis vinifera* L.) во многих регионах мира свидетельствует о большой зависимости проявления биологических особенностей сортов этого ценного растения от приемов возделывания и экологических условий [1]. Все виды винограда в той или иной степени теплолюбивы, но самым не зимостойким является виноград культурный, различные сорта которого по-разному реагируют на низкие температу-

Национальная академия наук Беларуси

ры. В последние годы к проблеме зимостойкости в климатических условиях Республики Беларусь добавилось и действие засухи в сочетании с экстремально высокими колебаниями температуры в летнее время, что повышает требования к селекции устойчивых сортов винограда.

Интегратором влияния окружающей среды на качество ягод и вина являются листья, содержащие фотосинтетический аппарат. Для сравнительной сортовой характеристики фотосинтетического аппарата при разных условиях выращивания и минерального питания растений винограда в некоторых случаях используют морфометрические показатели и оптические свойства листьев [2]. В последнее время отмечается инициированный агрономами и фитопатологами интерес к разработке и использованию приемов быстрой (путем неразрушающего контроля) оценки состояния растений винограда в естественных условиях [3; 4]. В ряде работ приводятся данные, свидетельствующие о том, что содержание хлорофилла может служить индикатором физиологического состояния растений, имеющим диагностическое значение при определении перехода растения в состояние стресса [4—7]. С учетом сказанного важно знать, как ведет себя фотосинтетический аппарат листьев винограда как светолюбивого и теплолюбивого растения в далеко не оптимальных для этой культуры условиях вегетации нашей климатической зоны, и могут ли показатели пигментного аппарата использоваться в диагностических целях.

Известно, что адаптация растений к действию негативных факторов внешней среды осуществляется на разных уровнях биологической организации (клетка, организм, популяция), но несмотря на это при различных воздействиях существуют общие (однотипные и неспецифичные) механизмы стрессового ответа [8; 9]. Это фундаментальное положение является ключевым при разработке тестов на стрессочувствительность и стрессоустойчивость растений. С этих позиций диагностический интерес при стрессе могут представлять несколько ключевых параметров, рассмотренных в настоящей работе.

Важными компонентами тонкой структуры фотосинтетического аппарата являются пластидные пигменты: хлорофиллы, выполняющие фотосинтетическую функцию, и осуществляющие светосбор каротиноиды. Отдельные представители последних играют фотопротекторную роль как тушители триплетного хлорофилла и синглетного кислорода и ингибиторы перекисного окисления липидов [10]. Кроме того, они стабилизируют тилакоидные мембраны и препятствуют резкому увеличению их проницаемости [11]. Имеются данные о том, что при стрессовых воздействиях на растения винограда меняется относительное содержание хлорофилла и каротиноидов [6]. Таким образом, индикатором состояния растений при стрессе может служить не только абсолютное содержание хлорофилловых пигментов [4—7], но и относительное содержание зеленых и желтых фотосинтетических пигментов, существенные изменения которого могут носить диагностический характер.

Реакция растения на стрессовое воздействие может быть оценена и по содержанию непластидных пигментов флавиновой природы антоцианов, участвующих в окислительно-восстановительных обменных процессах и в повышении активности окислительных ферментов (пероксидазы, аскорбатоксидазы) [12].

Национальная академия наук Беларуси

Информативным параметром является состояние липидных компонентов мембран, в частности, уровень перекисного окисления липидов, поскольку накопление окисленных липидов и возникающих из них продуктов является одной из причин дестабилизации структуры липидного бислоя и нарушений мембранных функций растений [13].

В свете сказанного представляет интерес скрининг названных выше параметров у сортов винограда, интродуцированных в Республике Беларусь, и сопоставление полученных результатов с данными об устойчивости этих сортов, основанными на других наблюдениях [14]. Важно сопоставить показатели фотосинтетического аппарата в листьях разных сортов внутри одинаковых по холодоустойчивости групп, а также сравнить их с данными для растений винограда, культивируемого в других климатических зонах. Полученные при этом результаты позволят оценить возможность использования отдельных биохимических параметров либо их совокупности для прогнозирования стрессоустойчивости винограда. Эта информация может быть учтена современными селекционерами при создании сортов, устойчивых к абиотическим и биотическим условиям среды, особенно в контексте меняющегося климата.

Материалы и методы исследования. Работу проводили на 20 интродуцированных в Республике Беларусь сортах винограда, отличающихся устойчивостью к низким температурам (группы с высокой, средней и низкой устойчивостью), цветом плодов (зеленый, синий, красный, розовый, белый) и особенностями использования (технические и столовые сорта) (табл. 1).

Таблица 1. **Характеристика сортов винограда по цвету и срокам созревания плодов**

Устойчивость к холоду, по [14]	Технические сорта			Столовые сорта		
	Сорт	Плоды	Срок созревания	Сорт	Плоды	Срок созревания
Высокоустойчивые	Альфа	Синие	Средний			
	Голубок	Синие	Средний			
	MN 1094	Синие	Раннесредний			
Устойчивые	Бианка	Зеленые	Раннесредний	Супага	Зеленые	Ранний
	Душистый	Зеленые	Средний			
	Кристалл	Белые	Очень ранний (110—115 дней)			
	Платовский	Розовые	Очень ранний			
Среднеустойчивые	Мускат десертный	Зеленые	Средний	Виктория	Красные	Ранний
	Мускат Нины	Зеленые	Очень ранний	Июльский	Синие	Очень ранний
	Сувенир Васьковского	Розовые	Средний	Краса Севера	Зеленые	Ранний
				Нептун	Красно-фиолетовые	Ранний
Слабоустойчивые	Португизер	Синие	Ранний	Алешенькин	Зеленые	Очень ранний
				Декабрьский	Синие	Поздний
				Новоукраинский ранний	Розовые	Ранний
Неустойчивые				Дунав	Красные	Поздний

Национальная академия наук Беларуси

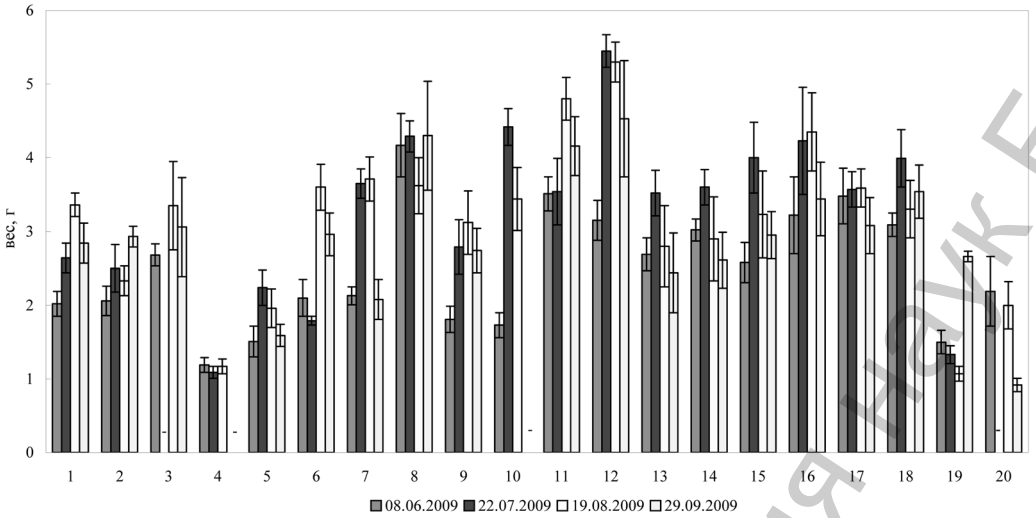

Рис. 1. Изменение массы листьев средних ярусов в процессе вегетации разных сортов винограда: *1* – Альфа, *2* – Голубок, *3* – MN 1094, *4* – Бианка, *5* – Душистый, *6* – Кристалл, *7* – Платовский, *8* – Супага, *9* – Мускат десертный, *10* – Мускат Нины, *11* – Сувенир Васьковского, *12* – Виктория, *13* – Июльский, *14* – Краса Севера, *15* – Нептун, *16* – Португизер, *17* – Алешенькин, *18* – Декабрьский, *19* – Новоукраинский ранний, *20* – Дунав

В период созревания лозы (октябрь — первая декада декабря 2008 г.) относительная влажность воздуха изменялась от 86 до 95 %. Температура воздуха в январе 2009 г. снижалась до —29,4 °С, глубина промерзания почвы в первой декаде февраля составила 56 см. Морозный период с температурой воздуха ниже —10 °С длился без оттепелей со второй декады декабря 2008 г. по вторую декаду марта 2009 г., т. е. около 100 дней. Сумма отрицательных температур составила 715 °С, высота снежного покрова — 21—35 см.

Исследования проводили на разных стадиях вегетации — от начала июня до конца сентября 2009 г. Сумма активных температур, превышающих 10 °С, за период с третьей декады апреля по третью декаду сентября 2009 г. составила 2333,2 °С. Сумма осадков в период вегетации винограда с мая по сентябрь составила 479 мм.

Анализировали листья 3—8 ярусов. Пигменты экстрагировали из высечек листьев ацетоном. Количество хлорофиллов и каротиноидов определяли по спектрам поглощения (спектрофотометр «Uvikon 931», Германия), используя соответствующие растворителю коэффициенты экстинкции [15]. Содержание фотосинтетических пигментов пересчитывали на единицу площади и сырой массы листа.

Для определения содержания антоцианов высечки (навеска в пределах 300 мг) из ткани листа (в некоторых случаях — взвешенные черешки листьев) растирали в ступке с кварцевым песком и несколькими каплями 1 %-ного раствора HCl. В полученный гомогенат добавляли 2 мл 1 %-ного раствора HCl и центрифугировали его в течение 10 мин при 7000 об/мин (центрифуга ОПН-8). Процедуру повторяли несколько раз до полного обесцвечивания осадка. Собранные фракции супернатантов доводили 95 %-ным этанолом до общего

Национальная академия наук Беларуси

объема 20 мл, затем вновь осветляли растворы центрифугированием и измеряли их оптическую плотность при 535 нм (спектрофотометр «Uvikon 931», Германия). Для расчета количества антоцианов в сырой массе навески использовали молярный коэффициент экстинкции для красителя Конго красный (0,028) [16].

Уровень перекисного окисления липидов оценивали по содержанию малонового диальдегида (МДА). Для этого 300 мг листьев гомогенизировали в фосфатном буфере, pH 7,2, добавляли к суспензии 0,5 %-ную тиобарбитуровую кислоту (ТБК), растворенную в 20 %-ной трихлоруксусной кислоте (ТХУ), и измеряли оптическую плотность образовавшегося продукта при 532 нм, учитывая неспецифическое поглощение при 600 нм. Молярный коэффициент экстинкции для МДА—ТБК-продукта — 155 мкмолей$^{-1}$см$^{-1}$.

Статистическую обработку результатов проводили по [17].

Результаты и их обсуждение. *Морфология листа*. На рисунке приведены данные, позволяющие судить об изменении массы листа средних ярусов у разных сортов винограда в течение вегетационного периода 2009 г. Видно, что в подавляющем большинстве случаев межсортовые различия превалировали над вегетационными колебаниями массы анализируемых листьев. Довольно резко отличались низкой массой листа на протяжении всего вегетационного периода такие сорта, как Бианка, Новоукраинский ранний, Душистый и Ду-

Таблица 2. **Содержание хлорофиллов ($a + b$, мкг/см^2) в листьях разных сортов винограда в ходе вегетационного периода 2009 г.**

Устойчивость к холоду по [14]	Сорт	Месяц			
		Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Высокоустойчивые, технические	Альфа	11,71 ± 0,99	11,29 ± 1,57	14,67 ± 1,55	12,35 ± 2,98
	Голубок	16,25 ± 0,24	21,72 ± 1,71	18,61 ± 1,38	19,93 ± 2,70
	MN 1094	18,10 ± 0,34	–	16,23 ± 1,01	14,15 ± 0,02
Устойчивые, технические	Бианка	13,73 ± 0,56	12,68 ± 0,35	16,43 ± 0,66	–
	Душистый	10,37 ± 1,03	14,52 ± 2,12	9,51 ± 0,72	16,19 ± 2,85
	Кристалл	16,12 ± 1,40	10,99 ± 0,72	16,18 ± 1,15	9,573 ± 2,28
	Платовский	19,20 ± 0,68	15,55 ± 0,88	10,94 ± 0,41	9,99 ± 0,82
Устойчивые, столовые	Супага	18,74 ± 1,29	19,26 ± 1,65	27,23 ± 0,25	23,17 ± 0,32
Среднеустойчивые, технические	Мускат десертный	20,02 ± 1,47	19,51 ± 2,79	16,61 ± 0,59	17,15 ± 0,00
	Мускат Нины	10,21 ± 0,59	18,93 ± 0,45	10,59 ± 0,02	–
	Сувенир Васьковского	13,82 ± 0,38	13,60 ± 1,56	13,75 ± 0,60	12,07 ± 1,80
Среднеустойчивые, столовые	Виктория	19,13 ± 0,14	25,59 ± 5,07	33,70 ± 0,64	27,23 ± 0,95
	Июльский	20,96 ± 0,95	18,85 ± 0,94	16,20 ± 0,18	12,96 ± 1,83
	Краса Севера	17,75 ± 1,56	19,49 ± 3,07	14,92 ± 0,79	12,27 ± 0,04
	Нептун	22,20 ± 0,64	19,92 ± 2,11	13,22 ± 0,04	10,83 ± 0
Слабоустойчивые, технические	Португизер	18,00 ± 1,18	15,69 ± 0,85	12,67 ± 0,49	15,00 ± 1,85
Слабоустойчивые, столовые	Алешенькин	15,96 ± 1,27	20,12 ± 0,42	12,73 ± 0,21	13,07 ± 0,00
	Декабрьский	17,70 ± 0,28	22,81 ± 3,19	16,12 ± 1,28	13,93 ± 0,46
	Новоукраинский ранний	13,53 ± 0,91	18,82 ± 1,02	11,59 ± 0,54	12,23 ± 0
Неустойчивые, столовые	Дунав	13,46 ± 0,75	–	12,00 ± 1,34	15,06 ± 1,50

Национальная академия наук Беларуси

нав, относящиеся, согласно данным табл. 1, к разным по устойчивости к холоду группам. В группе устойчивых сортов заметны различия между техническими и столовыми сортами (более массивны листья последних).

Фотосинтетические пигменты. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях разных сортов винограда в пересчете на единицу площади представлено в табл. 2 и 3. Анализ данных свидетельствует о значительной межсортовой вариабельности содержания хлорофиллов и каротиноидов (от 9,5 до 33 мкг/см^2 для суммы хлорофиллов *a* и *b* и от 2,3 до 6,5 мкг/см^2 для суммы каротиноидов у разных сортов). Если исключить из этого ряда 2 столовых сорта (Викторию и Супага), в листьях которых максимальное содержание хлорофиллов достигало 27—33 мкг/см^2, то диапазон межсортового разброса в содержании хлорофиллов составит 9,5—22,8 мкг/см^2. Для сравнения рассмотрим данные о содержании хлорофиллов в естественных условиях развития в других климатических зонах. В исследованиях, выполненных в Австралии [6], было показано, что содержание хлорофиллов — сортоспецифический параметр, сильно реагирующий на условия выращивания. Так, в листьях трехлетних растений, выращенных в стеклянном домике, количество хлорофиллов было существенно ниже, чем при выращивании в открытом грунте. В адаптированных к условиям Туниса сортах винограда количество хлорофиллов ($a + b$) в отсутствие некротического поражения листьев было не менее 30 мкг/см^2 [5].

Таблица 3. **Содержание каротиноидов (мкг/см^2) в листьях разных сортов винограда в течение вегетационного периода 2009 г.**

Устойчивость к холоду по [14]	Сорт	Месяц			
		Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Высокоустойчивые, технические	Альфа	4,53 ± 0,23	3,42 ± 0,35	4,37 ± 0,10	4,01 ± 0,98
	Голубок	4,8 ± 0,18	4,48 ± 0,09	4,32 ± 0,09	4,60 ± 0,49
	MN 1094	5,04 ± 0,13	–	4,51 ± 0,08	3,98 ± 0,01
Устойчивые, технические	Бианка	3,96 ± 0,20	3,09 ± 0,04	4,00 ± 0,16	–
	Душистый	3,34 ± 0,20	3,68 ± 0,19	3,49 ± 0,46	4,79 ± 0,42
	Кристалл	5,23 ± 0,26	2,64 ± 0,14	3,85 ± 0,18	2,76 ± 0,51
	Платовский	4,86 ± 0,31	3,57 ± 0,29	2,80 ± 0,04	2,31 ± 0,20
Устойчивые, столовые	Супага	4,86 ± 0,68	4,25 ± 0,42	5,70 ± 0,12	5,51 ± 0,27
Среднеустойчивые, технические	Мускат десертный	5,12 ± 0,71	4,41 ± 0,37	3,97 ± 0,27	4,36 ± 0,00
	Мускат Нины	3,04 ± 0,17	4,72 ± 0,18	3,46 ± 0,07	–
	Сувенир Васьковского	3,86 ± 0,29	2,95 ± 0,22	3,53 ± 0,16	2,83 ± 0,40
Среднеустойчивые, столовые	Виктория	6,45 ± 0,09	6,00 ± 0,98	6,20 ± 0,09	5,95 ± 0,13
	Июльский	5,72 ± 0,17	4,74 ± 0,32	4,19 ± 0,12	3,18 ± 0,42
	Краса Севера	4,38 ± 0,49	4,28 ± 0,37	3,64 ± 0,02	3,20 ± 0,08
	Нептун	6,11 ± 0,12	4,62 ± 0,32	3,34 ± 0,12	2,66 ± 0,00
Слабоустойчивые, технические	Португизер	5,08 ± 0,34	3,79 ± 0,16	2,72 ± 0,20	4,02 ± 0,59
Слабоустойчивые, столовые	Алешенькин	4,59 ± 0,44	4,23 ± 0,13	3,41 ± 0,10	4,37 ± 0,00
	Декабрьский	5,57 ± 0,12	5,03 ± 0,76	3,81 ± 0,24	3,67 ± 0,05
	Новоукраинский ранний	3,95 ± 0,05	3,68 ± 0,14	2,86 ± 0,18	3,17 ± 0,00
Неустойчивые, столовые	Дунав	4,22 ± 0,40	–	3,18 ± 0,40	4,09 ± 0,14

Национальная академия наук Беларуси

В Польше в черенках устойчивого к холоду (до —20 °С) винограда сорта Chrupka zlota на 75-й день после появления первых корней содержание хлорофилла в листьях составило 3000 мкг на 1 г свежего веса [7], в то время как в коллекции исследованных нами сортов максимальное количество пигментов достигало лишь 2200 мкг на 1 г свежего веса (сорт Супага). Как отмечено выше, максимальное содержание хлорофиллов в интродуцированных в Республике Беларусь сортах изменялось в пределах 22,8—33,0 мкг/см^2, а у сорта Edelweiss (Vitis labrusia hybrid, Minnesota 78 × Ontario) в климатических условиях северных штатов США — от 30 до 57 мкг/см^2 [4].

Таким образом, в подавляющем большинстве исследованных нами сортов винограда, интродуцированных в Республике Беларусь, содержание фотосинтетических пигментов в листьях не достигало значений, характерных для растений винограда, вегетирующих в более теплых климатических зонах. Интересно отметить, что количество пигментов в листьях винограда, наблюдавшееся в нашем эксперименте, было почти в 2 раза ниже, чем в закончивших рост листьях произрастающих в Республике Беларусь злаков [18].

Анализ динамики накопления фотосинтетических пигментов у разных сортов за весь вегетационный период 2009 г. показал, что характер накопления пигментов довольно разнообразен. У некоторых сортов наблюдали постепенное нарастание содержания пигментов вплоть до августа и высокое содержание в сентябре. У других пик в содержании приходился на более ранние сроки вегетации. Были и такие, у которых пигмент быстро разрушался во второй половине вегетации. Интересно, что у технического сорта Альфа, относящегося к группе высокоустойчивых сортов и принятого по совокупности свойств за контроль, содержание хлорофилловых пигментов было низким, но достаточно устойчивым во второй половине вегетационного периода — в августе и сентябре. Два других высокоустойчивых технических сорта винограда (Голубок и MN 1094), относящихся к той же по устойчивости к холоду группе, что и сорт Альфа, отличались от последнего более высоким содержанием хлорофиллов, но тип кинетики во всех трех сортах был близок. Главная его черта — высокий уровень пигментов во второй половине вегетации, связанный с устойчивостью фотосинтетического аппарата либо с его быстрым обновлением.

В группе среднеустойчивых и устойчивых сортов технического типа сортовые различия по динамике накопления пигментов были более существенными. Различия по характеру кинетики накопления пигментов между сортами внутри среднеустойчивых и слабоустойчивых групп столового типа были несущественными. Исключение составил только сорт Виктория с самым высоким содержанием фотосинтетических пигментов, который по типу кинетики можно было бы отнести к группе высокоустойчивых.

У всех слабоустойчивых к холоду сортов столового типа содержание пигментов уже в июне достигало максимальных значений и начинало уменьшаться. Интересно, что фотосинтетические пигменты у большинства сортов катастрофически не разрушались даже к концу сентября. Такая картина не характерна для большинства однодольных и двудольных растений, у которых даже листья верхних ярусов довольно быстро отмирают по мере созревания урожая.

Национальная академия наук Беларуси

В табл. 4 показано изменение важного показателя состояния светособирающей системы фотосинтетического аппарата — величины отношения содержания хлорофиллов *a* и *b*. Видно, что характерной особенностью культуры винограда при вегетации в реальных погодных условиях является довольно низкая величина этого отношения. У большинства сортов она была ниже 2,6 и заметно изменялась в ходе вегетации растений, особенно у средне- и слабоустойчивых сортов. У злаков величина отношения между содержанием хлорофиллов *a* и *b*, как правило, около 3,0. Наибольшая вариабельность структурного состояния фотосинтетического аппарата, оцениваемая по величине отношения хлорофиллов *a* и *b* (от 2 до 3), наблюдалась у сортов винограда с зеленым цветом ягод. В работе [6] показано, что при выращивании укорененных черенков в условиях закрытого грунта отношение хлорофиллов *a* и *b* мало реагировало на корневое поражение гнилью, водный и минеральный стресс и изменялось при различных воздействиях в пределах 3,2—3,5, не обнаруживая сортовых различий. В полевых же экспериментах величина отношения хлорофиллов у одного сорта составляла 2,1, а у другого — 2,7, при этом реакция на поражение корней либо отсутствовала (там, где отношение было около 2,1), либо сводилась к повышению величины отношения хлорофиллов *a* и *b*. Вероятнее всего, именно в полевых условиях величина отношения хлорофиллов отражает адаптацию растений к изменяющимся условиям среды. В целом следует отметить, что у винограда при выращивании в открытом грунте, в том числе и в условиях нашего эксперимента, светособирающая система по своему поведению напоминала ситуацию, наблюдаемую у теневыносливых растений [19].

Таблица 4. **Изменение соотношения фотосинтетических пигментов в листьях винограда на разных стадиях вегетационного периода 2009 г.**

Устойчивость к холоду по [14]	Сорт	Хл *a*/*b*		Хл (*a* + *b*)/Каротиноиды	
		Июнь	Август	Июнь	Август
Высокоустойчивые, технические	Альфа	2,51 ± 0,35	2,03 ± 0,65	2,68 ± 0,39	3,36 ± 0,35
	Голубок	2,89 ± 0,02	2,46 ± 0,04	3,54 ± 0,09	4,31 ± 0,41
	MN 1094	2,68 ± 0,01	2,58 ± 0,01	3,6 ± 0,16	3,60 ± 0,16
Устойчивые, технические	Бианка	2,81 ± 0,12	2,51 ± 0,06	3,49 ± 0,32	4,11 ± 0,02
	Душистый	2,45 ± 0,28	2,75 ± 0,12	3,07 ± 0,13	2,75 ± 0,16
	Кристалл	2,81 ± 0,04	2,37 ± 0,01	3,19 ± 0,11	4,20 ± 0,11
	Платовский	2,62 ± 0,22	2,43 ± 0,03	3,94 ± 0,39	3,91 ± 0,19
Устойчивые, столовые	Супага	2,68 ± 0,04	2,52 ± 0,03	3,89 ± 0,28	4,78 ± 0,05
Среднеустойчивые, технические	Мускат десертный	2,83 ± 0,05	2,65 ± 0,02	3,95 ± 0,26	4,20 ± 0,17
	Мускат Нины	2,02 ± 0,02	2,76 ± 0,06	3,36 ± 0,14	3,07 ± 0,13
	Сувенир Васьковского	2,65 ± 0,02	2,47 ± 0,01	3,59 ± 0,17	3,90 ± 0,01
Среднеустойчивые, столовые	Виктория	3,02 ± 0,05	2,38 ± 0,04	2,97 ± 0,02	5,44 ± 0,19
	Июльский	2,8 ± 0,07	2,51 ± 0,01	3,66 ± 0,06	3,87 ± 0,07
	Краса Севера	2,84 ± 0,01	2,59 ± 0,05	4,06 ± 0,1	4,10 ± 0,20
	Нептун	2,96 ± 0,02	2,36 ± 0,06	3,63 ± 0,04	3,96 ± 0,02
Слабоустойчивые, технические	Португизер	2,85 ± 0,06	2,25 ± 0,01	3,55 ± 0	4,67 ± 0,17
Слабоустойчивые, столовые	Алешенькин	3,03 ± 0,02	2,61 ± 0,04	3,48 ± 0,06	3,74 ± 0,05
	Декабрьский	2,79 ± 0,08	2,48 ± 0,00	3,18 ± 0,12	4,22 ± 0,07
	Новоукраинский ранний	2,66 ± 0,01	2,58 ± 0,05	3,43 ± 0,28	4,08 ± 0,32
Неустойчивые, столовые	Дунав	2,73 ± 0,02	2,56 ± 0,05	3,2 ± 0,13	3,79 ± 0,12

Национальная академия наук Беларуси

Величина отношения содержания хлорофиллов и каротиноидов в листьях разных сортов винограда также не оставалась постоянной в процессе вегетации (табл. 4). Хорошо видно, что на достаточно ранней стадии вегетации (начало июня) эта величина в среднем колебалась в пределах 3,5, в середине вегетационного периода она повысилась до значений ≥4,5 без существенных сортовых различий, а в конце вегетационного периода снизилась у большинства сортов в основном за счет снижения содержания хлорофиллов (данные не показаны). На стадии максимального содержания пигментов по этому параметру наиболее заметно различались сорта с красным цветом ягод Виктория (среднеустойчивый) и Дунав (неустойчивый): отношение хлорофиллы/каротиноиды соответственно 5,44 и 3,79. В работе [6] обнаружена тенденция к увеличению отношения общего содержания каротиноидов и хлорофиллов (величина, обратная приведенной в табл. 4) при биотическом стрессе в полевых условиях. При этом наблюдался рост содержания каротиноидов виолаксантинового цикла и увеличение относительного содержания антераксантина и зеаксантина в общем пуле ксантофиллов. Эти данные указывают на диагностические возможности соотношения содержания зеленых и желтых пигментов при стрессе, даже если последние представлены в виде общей суммы каротиноидов. Известно, что одним из условий работы защитного ксантофиллового цикла при абиотическом стрессе является высокая интенсивность освещения [20]. Поскольку в нашем эксперименте световые условия не являлись стрессовым фактором, то для увеличения диагностической ценности указанного показателя, скорее всего, надо ориентироваться не только на содержание пигментов в реальных погодных условиях, но и на ярком свету.

В табл. 5 приведены значения коэффициентов корреляции, указывающие на взаимосвязь между изменением параметров пигментного аппарата в ходе вегетационного периода. При нормальных условиях развития злаков содержание хлорофиллов и каротиноидов обычно изменяется сцепленно и коэффициент корреляции между этими двумя параметрами часто приближается к 1. Отклонение некоторых сортов винограда от типичных корреляционных взаимосвязей между изменением содержания двух главных фотосинтетических пигментов заслуживает особого внимания и требует более детального изучения. В нашем эксперименте наблюдали отрицательную корреляцию между изменением содержания хлорофиллов и каротиноидов в ходе вегетации у сорта Голубок и Виктория и низкое значение коэффициента корреляции у сорта Алешенькин. Отсутствие положительной корреляция между накоплением хлорофиллов и каротиноидов у сортов с высоким содержанием хлорофиллов можно объяснить следующим образом. При избытке хлорофилла в ткани поглощенная хлорофиллом энергия может не полностью трансформироваться в фотохимических реакциях, вызывая генерацию активных форм кислорода, в нейтрализацию которых включается антиоксидантная система. Если взаимодействие отдельных компонентов этой системы не достаточно сбалансировано, то преимущественное участие каротиноидов в этом процессе может привести к частичному разрушению последних.

На наш взгляд, важное значение для оценки стрессочувствительности могут иметь и коэффициенты корреляции между изменением соотношения хло-

Национальная академия наук Беларуси

Т а б л и ц а 5. **Корреляционные взаимодействия между параметрами фотосинтетического аппарата в листьях винограда в течение вегетационного периода 2009 г.**

Устойчивость к холоду по [14]	Сорт	А	Б
Высокоустойчивые, технические	Альфа	0,49	−0,31
	Голубок	−0,54	−0,68
	MN 1094	1,00	0,99
Устойчивые, технические	Бианка	0,99	0,81
	Душистый	0,83	−0,47
	Кристалл	0,86	0,77
	Платовский	0,99	0,88
Устойчивые, столовые	Супага	0,86	−0,75
Среднеустойчивые, технические	Мускат десертный	0,83	−0,12
	Мускат Нины	0,98	0,77
	Сувенир Васьковского	0,71	0,07
Среднеустойчивые, столовые	Виктория	−0,46	0,36
	Июльский	0,99	0,59
	Краса Севера	0,95	0,57
	Нептун	0,97	0,97
Слабоустойчивые, технические	Португизер	0,97	0,52
Слабоустойчивые, столовые	Алешенькин	0,40	0,21
	Декабрьский	0,66	0,43
	Новоукраинский ранний	0,57	−0,46
Неустойчивые, столовые	Дунав	0,99	0,11

П р и м е ч а н и я: А – коэффициент корреляции (*r*) между изменением содержания хлорофиллов и каротиноидов; Б – коэффициент корреляции (*r*) между отношением хлорофиллов *a* и *b* и содержанием каротиноидов.

рофиллов *a* и *b*, величина которого характеризует количество антенных комплексов фотосистемы 2, осуществляющих светосбор, и общим содержанием каротиноидов в листе. Высокие положительные значения коэффициента корреляции между величиной отношения хлорофиллов *a* и *b* и содержанием каротиноидов обнаружены только у четырех устойчивых сортов технической направленности. Эти данные можно трактовать как сбалансированное соотношение системы светосбора и одного из главных элементов защиты хлорофилла от разрушения при абиотическом стрессе — каротиноидов. Отрицательные значения коэффициентов корреляции обнаружены у сортов Альфа, Голубок, Виктория, Душистый, Мускат десертный, Супага, Новоукраинский, а низкие значения — у сортов Сувенир Васьковского, Виктория, Алешенькин и Дунав. Известно, что при стрессе может происходить дополнительный синтез каротиноидов, а не хлорофиллов, и в этом случае, скорее всего, могут нарушиться корреляционные связи между двумя пигментными системами. В таком случае разнобой в значениях коэффициентов корреляции для разных сортов, интродуцированных в одну и ту же климатическую зону, может отражать их разную реакцию на стресс.

Антоцианы. Содержание антоцианов в листьях винограда представлено в табл. 6. Наибольшее количество этих пигментов, играющих важную роль в стрессовом ответе, обнаружено в листьях сортов с красным цветом ягод (15—17 мкг/г сырой массы листа). У остальных сортов содержание антоцианов в первой половине вегетационного периода не превышало 7 мкг/г свежего веса листа, что более чем на порядок ниже, чем в листьях ржи [12], томатов и тритика-

Национальная академия наук Беларуси

ле. У большинства сортов винограда присутствие этих непластидных пигментов становилось заметным только в конце вегетации. Интересно, что даже в сентябре у нескольких сортов (Альфа, Бианка, Супага, Мускат Нины) антоцианы в листьях не были обнаружены, в то время как у других их содержание увеличилось и изменялось в пределах 10—30 мкг/г сырой массы. У ряда сортов антоцианы были сосредоточены в листовых черешках. Например, у сортов Альфа, Голубок и Кристалл в августе их содержание в черешках составило 109,0 ± 0,002, 176,8 ± 0,002 и 95,7 ± 0,004 мкг/г сырой массы соответственно. Однако даже визуально присутствие антоцианов в черешках было заметно не у всех сортов.

Уровень перекисного окисления липидов. Оценка фонового уровня окислительных повреждений мембран в листьях винограда путем измерения перекисного окисления липидов по содержанию малонового диальдегида позволила обнаружить высокое содержание МДА (15—16 мкг/г св. веса) у «синих» и «красных» сортов с достаточно высокой устойчивостью к холоду (табл. 6). Сорта со средней и низкой холодоустойчивостью отличались более низким содержанием МДА (2,3—6,8 мкг/г св. веса листа). Эти данные противоречат общепринятым представлениям о реакции мембранных липидов на стресс, наблюдаемой у других растений (по крайней мере, на действие повышенных температур) [12]. Уровень перекисного окисления липидов в отделенных от растения листьях винограда, особенно на заключительной стадии онтогенеза растений (данные не приведены), существенно превышал наблюдаемый в растениях злаков [21—23]. Не исключено, что поведение систем антиокислительной защиты мембранных липидов отражает реакцию разных сортов винограда как теплолюбивой культуры на достаточно низкие ночные температуры в исследованные нами периоды развития растений в открытом грунте.

Таблица 6. **Содержание антоцианов и продуктов перекисного окисления липидов в листьях винограда**

Устойчивость к холоду по [14]	Сорт	Антоцианы, мкг/г св. веса, июнь	Антоцианы, мкг/г св. веса, сентябрь	МДА, мкмоль/г св. веса, июнь
Высокоустойчивые, технические	Альфа	4,8 ± 0,60	≤0,1	15,28 ± 0,50
	Голубок	6,7 ± 0,70	9,58 ± 0,48	6,80 ± 0,14
Устойчивые, технические	Бианка	6,1 ± 0,80	≤0,1	3,92 ± 0,13
	Кристалл	2,6 ± 0,40	≤0,1	17,37 ± 0,95
Устойчивые, столовые	Супага	≤0,1	≤0,1	2,72 ± 0,74
Среднеустойчивые, технические	Мускат десертный	≤0,1	17,36 ± 1,40	6,67 ± 0,12
	Мускат Нины	4,1 ± 0,30	≤0,1	12,64 ± 0,04
	Сувенир Васьковского	8,5 ± 1,10	36,12 ± 1,43	17,96 ± 0,95
Среднеустойчивые, столовые	Виктория	1,8 ± 0,20	20,89 ± 0,65	14,57 ± 0,21
	Июльский	1,7 ± 0,10	10,56 ± 0,80	6,92 ± 0,15
	Краса Севера	3,1 ± 0,50	12,91 ± 0,92	8,71 ± 0,35
	Нептун	17,4 ± 0,20	21,11 ± 0,64	15,73 ± 0,42
Слабоустойчивые, технические	Португизер	4,3 ± 0,90	19,76 ± 1,63	3,92 ± 0,15
Слабоустойчивые, столовые	Алешенькин	0,9 ± 0,10	15,61 ± 0,34	12,57 ± 0,22
	Декабрьский	0,8 ± 0,10	13,02 ± 1,45	15,86 ± 0,12
Неустойчивые, столовые	Дунав	15,6 ± 0,40	15,60 ± 1,41	7,76 ± 0,28

Национальная академия наук Беларуси

Заключение. Исследование динамики изменения содержания фотосинтетических пигментов и непластидных пигментов антоцианов в листьях средних ярусов 20 интродуцированных в Республике Беларусь сортов винограда в процессе вегетационного периода 2009 г., выращенных в условиях питомника (от стадии подготовки к цветению до полного созревания плодов), позволило прежде всего выявить ряд особенностей пигментного аппарата листьев винограда по сравнению с однодольными и двудольными растениями. На всех этапах вегетации растений винограда содержание фотосинтетических пигментов было ниже, чем в листьях злаков, растущих в наших климатических условиях, но сезонная устойчивость фотосинтетического аппарата винограда явно превышала наблюдаемую у злаков. В листьях винограда при развитии в условиях открытого грунта выражена тенденция к усилению светособирающей системы для осуществления фотосинтетической функции, что нашло отражение в сравнительно низком отношении хлорофиллов *a* и *b* (ниже 2,6 у преобладающего количества сортов, а у некоторых даже около 2,0) даже в конце вегетации. Содержание фотосинтетических пигментов во всех исследованных нами сортах (возможно, за исключением двух с самым высоким содержанием хлорофилла) было гораздо ниже, чем наблюдаемое в листьях винограда, произрастающего в странах с более теплым климатом. При этом содержание малонового диальдегида, характеризующего уровень перекисного окисления липидов, в листьях многих сортов винограда было высоким, а непластидных пигментов антоцианов — низким (по крайней мере, по сравнению с растениями злаков). Таким образом, данные о состоянии фотосинтетического аппарата в сочетании с результатами, характеризующими интенсивность окислительных процессов, позволяют предположить, что в климатических условиях Беларуси (по крайней мере, в течение вегетационного периода 2009 г.) растения винограда как теплолюбивого вида практически все время находились в условиях стресса (температурного и, возможно, недостаточной интенсивности освещения), что, вероятно, не способствовало максимальному накоплению пигментов, особенно хлорофилла *a* (на это указывает низкая величина отношения хлорофиллов *a* и *b*), и приводило к повышенному уровню продуктов перекисного окисления липидов. Характерно, что даже у сорта Виктория с самым высоким содержанием хлорофилла, вероятно, не срабатывали защитные системы, сдерживающие разрушительное действие активных форм кислорода, и уровень перекисного окисления липидов был особенно высоким (табл. 6).

Анализ полученных данных показывает, что простые корреляции между содержанием фотосинтетических пигментов у разных сортов винограда и их холодоустойчивостью, приведенной в табл. 1, не прослеживаются и для характеристики последней явно недостаточно одного хлорофиллового показателя. Результаты работы свидетельствуют о том, что при оценке стрессоустойчивости сортов винограда необходимо учитывать содержание фотосинтетических пигментов в естественных условиях вегетации только в совокупности с анализом динамики их накопления, величиной соотношения пигментов и другими показателями: как минимум, с уровнем антиоксидантной защиты и функциональной активностью фотосистемы 2.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Б09ГКНТ-009).

Национальная академия наук Беларуси

Литература

1. Р и с о в а н н а я В. И., Т р о ш и н Л. П. // Науч. тр. КГАУ. 2002. Вып. 394(422).
2. А р б а х а н о в Ю. М. // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. «Научно-прикладные аспекты дальнейшего развития и интенсификации виноградо-винодельческой отрасли в связи со вступлением России в ЕС и ВТО». Махачкала, 2007. С. 154—159.
3. S t a m a t i a d i s S., T a s k o s D., T s a d i l a s Ch. et al. // Am. J. Enol. Vitic. 2006. Vol. 57. P. 415—422.
4. S t e e l M. R., G i t e l s o n A. A., R u n d q u i s t D. C. // Agronomy J. 2008. Vol. 100. P. 779—782.
5. A b d a l l a c h F. B., E l l o u m i N., M e z g h a n i I. et al. // Research Report Fluoride. 2006. Vol. 39, № 1. P. 43—46.
6. B l a n c h f i e l d A. L., R o b i n s o n S. A., R e n z u l l o L. J., P o w e l l K. S. // Functional Plant Biology. 2006. Vol. 33. P. 507—513.
7. G o r n i k K., G r z e s i k M., R o m a n o w s k a - D u d a B. // J. of Fruit and Ornamental Plant Research. 2008. Vol. 16. P. 333—343.
8. В е с е л о в а Т. В., В е с е л о в с к и й В. А., Ч е р н а в с к и й Д. С. Стресс у растений (Биофизический подход). М., 1993.
9. L i c h t e n t h a l e r H. K. // J. Plant Physiol. 1996. Vol. 148. P. 4—14.
10. D e m m i g - A d a m s B. // Biochim. Biophys. Acta. 1990. Vol. 1020, № 1. P. 1—24.
11. С т р з а л к а К., К о с т е ц к а - Г у г а л а А., Л а т о в с к и Д. // Физиология растений. 2003. Т. 50. С. 188—193.
12. М и х а й л о в а С. А., З е н е в и ч Л. А., К л и м о в и ч А. С., К а б а ш н и к о в а Л. Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук. 2003. № 2. С. 56—59.
13. К у р г а н о в Л. Н., В е с е л о в А. П., С и н и ц ы н а Ю. В., Е л и к о в а Е. А. // Физиология растений. 1999. Т. 46. С. 218—222.
14. У с т и н о в В. Н., Р у с о в с к а я А. В. Виноградарство. Практическое пособие. Минск, 2009.
15. Ш л ы к А. А. // Биохимические методы в физиологии растений. М., 1971. С. 154—170.
16. Т о х в е р А. К., В о с к р е с е н с к а я Н. П. // Физиология растений. 1969. Т. 16, вып. 3. С. 187—195.
17. Р о к и ц к и й П. Ф. Биологическая статистика. Минск, 1972.
18. К а б а ш н и к о в а Л. Ф. Оптимизация структурно-функционального состояния фотосинтетического аппарата как фактор повышения продуктивности зерновых культур: дисс. … д-ра биол. наук. Минск, 2008.
19. A n d e r s o n J. M. // Ann. Rev. Plant Physiol. 1986. Vol. 37. P. 93—136.
20. D e m m i g - A d a m s B., G i l m o r e A. M., A d a m s W. W. // FASEB J. 1996. Vol. 10. P. 403—412.
21. А б р а м ч и к Л. М., С е р д ю ч е н к о Е. В., З е н е в и ч Л. А., К а б а ш н и к о в а Л. Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук. 2008. № 3. С. 59—62.
22. А б р а м ч и к Л. М., С е р д ю ч е н к о Е. В., К а б а ш н и к о в а Л. Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук. 2007. № 4. С. 69—72.
23. А б р а м ч и к Л. М., С е р д ю ч е н к о Е. В., З е н е в и ч Л. А., К а б а ш н и к о в а Л. Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук. 2008. № 4. С. 71—75.
24. C h e n L i-S., C h e n g L. // J. of Experimental Botany. 2003. Vol. 28. P. 1—11.

L. F. KABASHNIKOVA, L. M. ABRAMCHIK, V. N. MAKAROV, L. A. ZENEVICH, Ju. I. CHERLENOK, Z. Ja. KOZLOVSKAJA, V. N. USTINOV, G. E. SAVCHENKO

CHARACTERISTICS OF A PIGMENT APPARATUS OF INTRODUCED CULTIVARS OF GRAPE

Summary

Dynamics of accumulation of photosynthetic and non-plastid anthocyanin pigments has been examined during 2009 vegetation period for the middle-layer leaves of 20 grape cultivars introduced in the Republic of Belarus. An essential intervarietal diversity has been revealed regarding chlorophylls and carotenoids content. In different cultivars, maximal content of chlorophyll (as a total of *a* and *b* ones)

Национальная академия наук Беларуси

ranged from 9.5 to 33 μg·cm^{-2} whereas that of carotenoids was quantified as 2.3 to 6.5 μg·cm^{-2}. For almost all unhardy cultivars, the pigment content gained its maximal value already in June, though for the hardy ones it has been still increasing in August. For the majority of examined cultivars, no pronounced degeneration of photosynthetic pigments has been detected to the end of September. Correlation between chlorophylls and carotenoids content has been analyzed. Correlation indexes have been found to deviate from high positive values for a number of cultivars. For most of investigated cultivars, the content of photosynthetic pigments falls short of characteristic values for grape plants vegetating in warmer climate zones. Low content of photosynthetic pigments compared to other cultures, e. g. cereals, is indicative for a pigment system of photophilous grapes grown in Belarusian climate. The light harvesting system of photosynthetic machinery during the whole vegetation period resembled that of sciophytes with rather low ratio of chlorophylls a and b (less then 2.6). Most of examined grape cultivars demonstrated extremely small content (next lower order compared to the leaves of rye, triticale, and tomatoes) of anthocyanins known to play a major role in stress response. High content of malonic dialdehyde, especially at the early stages of vegetation, is typical for most of grape cultivars introduced in Belarus. This indicates intensive oxidative processes distinctive for stress.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 681.5.015

М. М. КОЖЕВНИКОВ, Н. И. УЛЬЯНОВ, С. Н. СУБОЧ

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ В РАБОЧЕЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Могилевский государственный университет продовольствия

(Поступила в редакцию 14.09.2010)

Предложен новый метод планирования траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на использовании топологически упорядоченной нейронной сети. Метод позволяет эффективно учесть сложную форму препятствий в промышленных роботизированных комплексах и обеспечивает приемлемое для практики количество тестов на столкновение.

Введение. Эффективное внедрение роботизированных технологических комплексов (РТК) тесно связано с созданием систем автономного программирования роботов. При этом одной из наиболее трудоемких задач является задача планирования траектории манипулятора в рабочей среде с препятствиями. Эта задача заключается в нахождении последовательности локаций робота, движение по которым не приводит к столкновениям с препятствиями, причем начальная и целевая конфигурации заданы заранее [1].

Большинство современных алгоритмов планирования траектории основаны на модели конфигурационного пространства робота-манипулятора, заданной в виде дискретного множества свободных от столкновений конфигураций. Наиболее значимые результаты в области планирования траекторий роботов получены Л. Кавраки и ее коллегами [2], которые предложили метод планирования, основанный на синтезе карты вероятных траекторий робота (probablbilistic roadmap). Такой подход впервые позволил эффективно решить проблему размерности, возникающую при планировании траектории в конфигурационном пространстве робота. Карта вероятных траекторий представляет собой граф, вершинам которого поставлены в соответствие свободные от столкновений конфигурации робота, а его ребрам — множество прямолинейных траекторий между этими конфигурациями, причем свободные от столкновений конфигурации генерируются случайным образом. Задача планирования траектории, таким образом, сводится к поиску прямолинейных участков траектории соединяющих стартовую и целевую конфигурации с вершинами графа и поиску кратчайшего пути на графе. Ряд модификаций этого метода

Национальная академия наук Беларуси

предложен в работах [3—8]. Так, в [5] рассматривается метод так называемой пассивной карты вероятных траекторий (lazy probablbilistic roadmap), в котором поиск ведется на графе без предварительной проверки на столкновение элементов траектории, соответствующих его вершинам и ребрам. Далее робот пытаются провести по найденной траектории, и в случае если столкновение обнаружено, из графа удаляется соответствующая вершина, либо ребро, и выполняется новый поиск. Основное преимущество такого подхода заключается в том, что нет необходимости в проведении теста столкновений для всего множества вероятных траекторий.

В работе Д. Хсу [6] предложен метод планирования, основанный на итерационном подходе к построению карты вероятных траекторий. Первоначально свободные от столкновений конфигурации робота выбираются в некоторой окрестности его начальной локации, и в граф добавляются соответствующие им вершины. Далее граница окрестности начальной локации последовательно расширяется до тех пор, пока в нее не попадет целевая конфигурация. Основной недостаток такого подхода заключается в сложности определения параметров итерационного алгоритма, которые существенно зависят от формы препятствий в конфигурационном пространстве [1].

В работе [9] предложен эффективный метод планирования, позволяющий искать траектории в конфигурационном пространстве высокой размерности. Этот метод основан на дискретизации конфигурационного пространства в соответствии с алгоритмом типа RRT (Rapidly-exploring Random Tree). Данный алгоритм заключается в последовательном выявлении свободных от столкновений конфигураций робота и включении их в дерево поиска. Первоначально случайным образом выбирается свободная от столкновения конфигурация и ищется ближайшая к ней конфигурация в дереве поиска, затем выполняется поиск траектории между этими двумя конфигурациями, и если такая траектория существует, то она добавляется в дерево поиска, в противном случае генерируется новая случайная конфигурация. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не найдена траектория между начальной и целевой конфигурациями. В отличие от подхода, предложенного в [6], параметры такого итерационного алгоритма не зависят от формы препятствий в конфигурационном пространстве, однако поиск промежуточных участков траектории является затратным по времени.

Общим недостатком всех алгоритмов планирования траекторий, основанных на генерации случайных конфигураций, является то, что траектория робота может быть найдена за конечное время лишь с определенной вероятностью, т. е. свойство «полноты» решения также обеспечивается лишь с определенной вероятностью [10; 11]. В частности, С. Лаваллем и его коллегами [11] показано, что при работе манипулятора в среде с препятствиями сложной формы методы планирования, основанные на детерминистических схемах дискретизации конфигурационного пространства, гораздо более эффективны по сравнению с вероятностными методами, вследствие их гарантированной сходимости за конечное число итераций.

В последние годы предложен ряд методов планирования траекторий, обеспечивающих свойство «полноты» решения в конфигурационном простран-

Национальная академия наук Беларуси

стве, которое дискретизировано с фиксированным разрешением. В ряде практических случаев эти методы более эффективны, чем вероятностные. Так, в работах [11—15] рассмотрен ряд алгоритмов, основанных на низкодисперсионной дискретизации конфигурационного пространства, которые были успешно применены для планирования траектории роботов в среде с препятствиями сложной формы. Такие алгоритмы выполняют поиск свободных от столкновений движений между дискретными конфигурациями, находящимися в узлах псевдослучайной решетки. Применение такой детерминистической схемы дискретизации позволяет гарантировать завершение поиска траектории робота за конечное время, если эта траектория существует. В работе [16] предложен метод планирования, основанный на использовании гармонической функции, наложенной на конфигурационное пространство, дискретизированное на основе нерегулярной сетки. На первом этапе этот метод предусматривает численный расчет гармонической функции, имеющей свой единственный максимум на узле сетки, который соответствует целевой конфигурации робота. На втором этапе выполняется градиентный поиск искомой траектории.

Ряд нейросетевых моделей для планирования траекторий роботов был предложен в работах [17; 18]. Эти модели основаны на модификации нейронной сети Хофилда, представляющей собой двухслойную структуру, которая выполняет поиск свободной от столкновения последовательности движений робота. Такой подход получил дальнейшее развитие в работах [19; 20], авторы которых предложили использовать для планирования траектории упорядоченную нейросетевую модель типа NRG (Neuro Resistive Grid). В такой модели каждой дискретной конфигурации робота ставится в соответствие нейрон. Для эффективного вычисления выхода сети NRG в работе [20] предложен итерационный алгоритм To&Fro. Этот алгоритм был успешно применен для планирования траектории промышленного робота-манипулятора MA2000. Другой тип нейросетевого алгоритма для планирования траектории робота-манипулятора в среде с препятствиями предложен в работе [21]. Этот алгоритм выполняет поиск оптимальной траектории посредством вычисления выхода топологически упорядоченной нейронной сети. Он применим только к упрощенным моделям конфигурационного пространства.

Необходимо отметить, что известные нейросетевые алгоритмы предполагают дискретизацию конфигурационного пространства с очень высоким разрешением, чтобы обеспечить существование прямолинейных участков траекторий (связанность) между узлами сетки дискретизации. Это ведет к тому, что количество тестов столкновения при планировании растет экспоненциально с ростом размерности конфигурационного пространства. С другой стороны, вероятностные алгоритмы позволяют обойти проблему размерности, но не учитывают форму препятствий и звеньев манипулятора, что приводит к реализации траекторий низкого качества с большим объемом движений, причем сходимость достигается только с некоторой вероятностью.

В данной работе предложен новый метод планирования траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на детерминистической дискретизации конфигурационного пространства, обеспечивающей свойство «полноты» решения. В отличие от известных этот метод

Национальная академия наук Беларуси

учитывает сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. Предложенный подход основан на топологически упорядоченной нейронной сети, которая моделирует весовую функцию, характеризующую расположение робота-манипулятора относительно препятствий. В соответствии с этим подходом первоначально генерируется приближенная траектория робота, конфигурационное пространство которого дискретизировано с низким разрешением, а также предполагается отсутствие столкновений при движении робота между узлами сетки дискретизации. Если при движении робота по такой траектории зафиксировано столкновение, то матрица связей в нейронной сети модифицируется и генерируется новая траектория при неизменном разрешении сетки дискретизации. Такой процесс повторяется до тех пор, пока свободная от столкновений траектория найдена, либо предельное число итераций достигнуто. Последнее означает, что необходимо увеличить разрешение сетки дискретизации и повторить процесс поиска траектории. Такой метод в отличие от известных позволяет генерировать траектории робота без предварительной проверки его движений на столкновение, что обеспечивает приемлемое для практики количество тестов столкновения при сохранении свойства «полноты» при фиксированном шаге дискретизации.

Постановка задачи. Рассмотрим робот-манипулятор с n поворотными сочленениями (рис. 1, *а*), в рабочей зоне которого расположено некоторое множество препятствий $B = \{B_1, B_2, \ldots, B_m\}$. Если конфигурационное пространство этого робота дискретизированно с разрешением N, то угол в каждом из сочленений j ($j = 1 : n$) может принимать дискретные значения q_{xj} ($xj \in \{1, \ldots, N\}$), при этом величины q_{1j} и q_{Nj} задают нижнее и верхнее конструктивные ограничения на углы в сочленениях (рис. 1, *б*). Тогда дискретная модель конфигурационного пространства рассматриваемого робота может быть представлена в виде множества из N^n векторов

$$DC = \{\mathbf{q}_a \,|\, a = 1, \ldots, N^n\}, \tag{1}$$

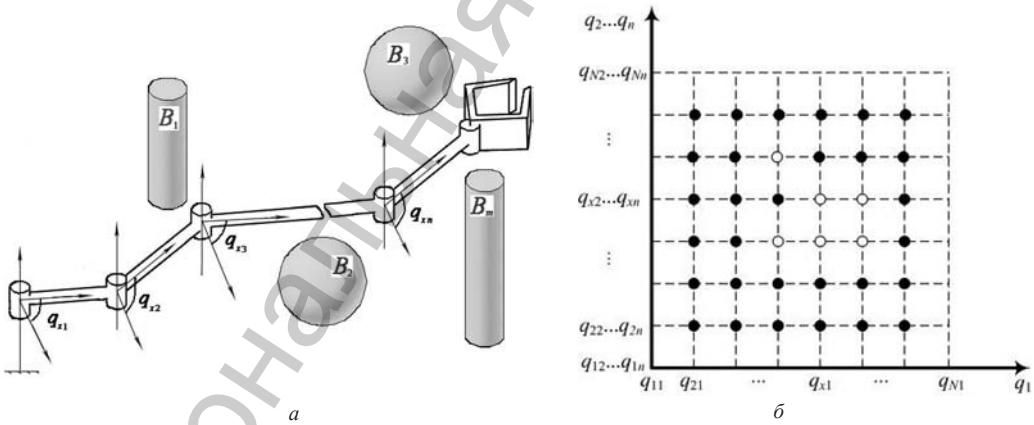

Рис. 1. Робот-манипулятор (*а*) и его дискретное конфигурационное пространство (*б*)

Национальная академия наук Беларуси

где $\mathbf{q}_a = [q_{xj}]^T$ — дискретная конфигурация робота ($xj \in \{1, ..., N\}$); a — одномерный индекс, значения которого вычисляются по формуле $a = N^{n-1}x1 + N^{n-2}x2 + ... + xn - 3$.

Множество свободных от столкновений конфигураций робота-манипулятора определяется следующим образом:

$$DC_f = \{\mathbf{q}_a \in DC \,|\, M(\mathbf{q}_a) \cap B = \varnothing\}, \tag{2}$$

где $M(\mathbf{q}_a)$ — робот-манипулятор M, установленный в конфигурацию $\mathbf{q}_a$.

Прямолинейный участок траектории между двумя конфигурациями $\mathbf{q}_a$ и $\mathbf{q}_b$ ($a \neq b$, $\mathbf{q}_a$, $\mathbf{q}_b \in DC_f$) задается в виде множества векторов

$$\mathbf{d}_{ab} = \{\mathbf{d}_k \,|\, M(\mathbf{d}_k) \cap B = \varnothing\}, \tag{3}$$

где $\mathbf{d}_k = \mathbf{q}_a + (h / Nh)(\mathbf{q}_b - \mathbf{q}_a)$, $h = 0 : Nh$, $Nh > N$, — параметр дискретизации прямолинейного участка траектории.

Дискретная конфигурация робота $\mathbf{q}_b \in DC_f$ является соседней с конфигурацией $\mathbf{q}_a \in DC_f$, если между ними существует прямолинейный участок траектории $\mathbf{d}_{ab}$ и индекс b удовлетворяет одному из соотношений:

$$\begin{aligned} &b_1 = a - N^{n-1} \to (x1-1, x2, \ldots, xn), \quad b_2 = a + N^{n-1} \to (x1+1, x2, \ldots, xn), \\ &\ldots \\ &b_{d-1} = a - 1 \to (x1, x2, \ldots, xn-1), \quad b_d = a + 1 \to (x1, x2, \ldots, xn+1). \end{aligned} \tag{4}$$

Таким образом, каждая конфигурация $\mathbf{q}_a$ может иметь $d \leq 2n$ соседних конфигураций.

Траектория, соединяющая стартовую $\mathbf{q}_{s1}$ и целевую $\mathbf{q}_{sg}$ конфигурации робота, представляет собой последовательность, состоящую из соседних конфигураций $\mathbf{q}_{s1}$, $\mathbf{q}_{s2}$, ..., $\mathbf{q}_{sg} \in DC_f$, и прямолинейных участков, соединяющих эти конфигурации $\mathbf{d}_{s1s2}$, $\mathbf{d}_{s1s2}$,..., $\mathbf{d}_{(sg-1)sg}$. Критерий «качества» траектории в дискретном конфигурационном пространстве зададим в виде

$$J = \sum_{k=1}^{g-1} T_{sk(sk+1)}(\mathbf{d}_{sk(sk+1)}), \tag{5}$$

где $T_{sk(sk+1)}$ — значение весовой функции для прямолинейного отрезка траектории $\mathbf{d}_{sk(sk+1)}$.

Тогда задача планирования траектории в дискретном конфигурационном пространстве может быть сформулирована следующим образом: среди всех последовательностей дискретных конфигураций $\mathbf{q}_{s1}$, $\mathbf{q}_{s2}$,..., $\mathbf{q}_{sg} \in DC_f$, координаты которых лежат внутри области, ограниченной предельно допустимыми значениями углов в сочленениях q_{1j} и q_{Nj} ($j = 1 : n$), найти последовательность, на которой достигает минимума критерий (5).

Следует также отметить, что необходимая величина параметра дискретизации N заранее неизвестна и существенно зависит от формы препятствий в конфигурационном пространстве робота-манипулятора.

Национальная академия наук Беларуси

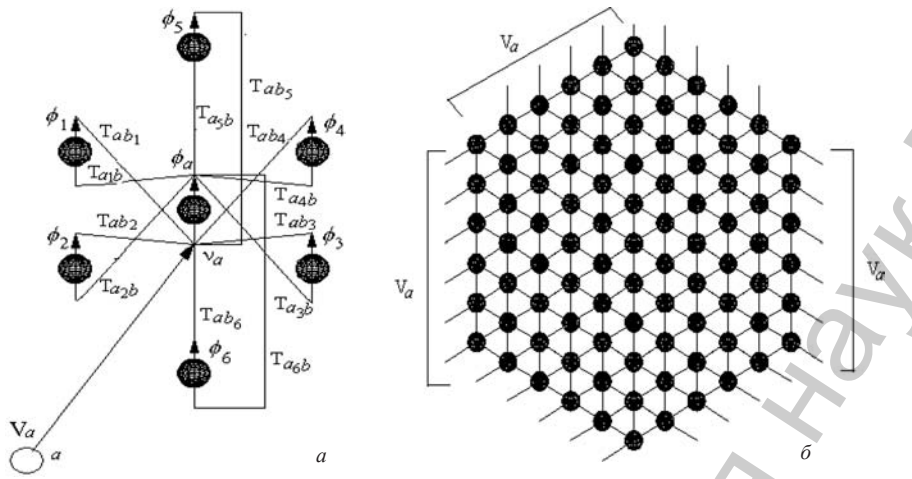

Рис. 2. Топологически упорядоченная нейронная сеть

Нейросетевая модель для планирования траектории. Для решения сформулированной выше задачи планирования траектории предлагается использовать метод, основанный на топологически упорядоченной нейронной сети. В отличие от известных моделей такого типа [19; 20], предложенная нейронная сеть представляет собой множество, состоящее из N^n нейронов, которые распределены над областью n-мерного конфигурационного пространства. Таким образом, каждой дискретной конфигурации робота $\mathbf{q}_a$ ставится в соответствие нейрон с индексом a, соединенный с d соседними нейронами, имеющими индексы b_k, $k = 1, \ldots, d$. Значения индексов b_k определяются в соответствии с (4), таким образом, расположение нейрона в системе координат нейронной сети соответствует некоторой конфигурации робота. Каждому прямолинейному участку траектории между двумя соседними конфигурациями $\mathbf{q}_a$ и $\mathbf{q}_b$ ставилась в соответствие величина весовой связи между нейронами a и b равная T_{ab_k}.

Пример такой структуры для робота с тремя степенями свободы ($n = 3$) представлен на рис. 2. Здесь на вход нейрона a поступает 6 взвешенных сигналов от соседних нейронов $T_{ab_1}\phi_1$, $T_{ab_2}\phi_2$, …, $T_{ab_6}\phi_6$ (рис. 2, *а*), где T_{ab_1} — T_{ab_6} — весовые коэффициенты.

Также на вход каждого нейрона a поступает внешний сигнал V_a (рис. 2, *б*), значение которого определяется следующим образом: $V_a = 1$, если $\mathbf{q}_a \notin DC_f$, либо $\mathbf{q}_a = [q_{1j}]^T$, ($j = 1 : n$), либо $\mathbf{q}_a = [q_{Nj}]^T$ ($j = 1 : n$); $V_a = 1$, если $\mathbf{q}_a = \mathbf{q}_{sg}$; $V_a = 0$ во всех остальных случаях.

Распределение потенциалов ϕ_a ($a = 1 : N^n$) на выходе нейронной сети с такой структурой определяет потенциальное поле робота-манипулятора, в соответствии со следующей системой уравнений:

$$\phi_a = f_a(\nu_a), \quad \tau_a \frac{d\nu_a}{dt} = \sum_{b=1}^{N^n} T_{ab}\phi_b - T_{a0}\nu_a + V_a, \tag{6}$$

Национальная академия наук Беларуси

где $f_a(\cdot)$ — функция активации нейрона a; v_a — значение потенциала на входе нейрона a; ϕ_b — значение потенциала на входе нейрона b, соседнего с нейроном a; τ_a, T_{ab}, T_{a0} — весовые коэффициенты нейронной сети.

Необходимо отметить, что в выражении (6) суммирование выполняется для всех $b = 1 : N^n$, однако только $d \le 2n$ элементов по знаком суммы не равны нулю, поскольку в предлагаемой модификации нейронной сети весовые связи имеются только между соседними нейронами. В качестве функции активации нейронов использована следующая функция:

$$f_a(\nu_a) = \begin{cases} 0, & \text{если } \nu_a < 0 \\ \tanh(\nu_a), & \text{если } \nu_a \ge 0 \end{cases}. \tag{7}$$

Значения потенциалов, соответствующие для каждой конфигурации $\mathbf{q}_a$, вычисляются путем численного решения (6) на основе следующей итерационной формулы:

$$\phi_a^{(l+1)} = f_a\left(\sum_{k=1}^{d} T_{ab_k}\phi_{b_k}^{(l)} + V_a\right), \tag{8}$$

где l — номер итерации.

Величина весовых коэффициентов T_{ab_k} выбирается исходя из условий асимптотической устойчивости нейронной сети [22; 23]. В частности, в работе [23] показано, что при $|T_{ab_k}|<1/3n$ обеспечивается асимптотическая устойчивость топологически упорядоченной нейронной сети с функциями активации вида (7). Таким образом, значения весовых коэффициентов устанавливаются следующим образом: $T_{ab_k}<1/3n$ если существует прямолинейный участок траектории между конфигурациями $\mathbf{q}_a$ и $\mathbf{q}_{bk}$, и $T_{ab_k} = 0$ в противном случае.

Вычисляемое по (8) потенциальное поле робота является унимодальным и достигает своего максимального значения $\phi_{sg} = 1$ в точке соответствующей целевой конфигурации $\mathbf{q}_{sg}$ [23; 24]. Тогда траектория робота $\mathbf{q}_{s1}$, $\mathbf{q}_{s2}$, …, $\mathbf{q}_{sg}$ минимизирующая критерий «качества» (5) может быть найдена путем подъема в направлении градиента потенциального поля от начальной точки с потенциалом ϕ_{s1} до целевой точки с потенциалом ϕ_{sg}. Такой метод планирования траектории реализован в виде алгоритма описанного в следующем разделе.

Алгоритм планирования траектории. Введем следующие обозначения: N_0 — начальное значение параметра дискретизации конфигурационного пространства; $N_{\max}$ — максимально допустимое значение параметра дискретизации конфигурационного пространства; N_s — шаг изменения параметра дискретизации; P — траектория робота. В предложенном алгоритме используются следующие функции: $\max f(\phi_{bk})$ — функция, возвращающая максимальное значение потенциала ϕ из множества ϕ_{bk}; $\max b(\phi_{bk})$ — функция, возвращающая индекс b максимального значения потенциала из множества ϕ_{bk}; $q(\phi)$ — функция, возвращающая конфигурацию робота, соответствующую значению потенциала ϕ; explore($q(\phi_a)$, $q(\phi_b)$) — функция проверки существования прямолинейного участка траектории между двумя конфигурациями робота $q(\phi_a)$ и $q(\phi_b)$ в соответствии с формулой (3). Если такой участок траектории существует, данная функция возвращает значение «1», в противном случае она возвращает значение «0».

Национальная академия наук Беларуси

С учетом этих обозначений алгоритм планирования траектории имеет вид:

Исходные данные: геометрическая модель робота и препятствий, стартовая $\mathbf{q}_{s1}$ и целевая $\mathbf{q}_{sg}$ конфигурации

1: Установить начальное значение параметра дискретизации $N \leftarrow N_0$;
2: **повторять**
3: Вычислить V_a для параметра дискретизации N;
4: Установить весовые коэффициенты нейронной сети в $T_{ab_k} \leftarrow 1/3n$ ($k = 1 : d$);
5: **повторять**
6: Вычислить потенциальное поле ϕ_a ($a = 1 : N^n$) используя (8);
7: $a \leftarrow s1$;
8: **повторять**
9: $\phi \leftarrow \max f(\phi_{b_k})$;
10: $b \leftarrow \max b(\phi_{b_k})$;
11: $p \leftarrow \text{explore}(q(\phi_a), q(\phi_b))$;
12: $\mathrm{P} \leftarrow \{q(\phi_a), q(\phi_b)\}$;
13: если $b = sg$, то возвратить траекторию P;
14: $a \leftarrow b$;
15: **до тех пор пока** $p = 0$;
16: $T_{ab_k} \leftarrow 0$;
17: $P \leftarrow 0$;
18: **до тех пор пока** $\phi_{s1} = 0$;
19: $N \leftarrow N + N_s$;
20: **до тех пор пока** $N \le N_{\max}$.

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Первоначально конфигурационное пространство робота дискретизируется с низким разрешением N_0 и предполагается, что между всеми соседними конфигурациями существуют прямолинейные участки траектории, т. е. всем весовым коэффициентам нейронной сети присваивается значение $1/3n$. Далее вычисляется потенциальное поле робота ϕ_a ($a = 1 : N^n$), и ищется траектория между стартовой $\mathbf{q}_{s1}$ и целевой $\mathbf{q}_{sg}$ конфигурациями путем подъема в направлении градиента. Для этого отрезки, соединяющие соседние конфигурации $\mathbf{q}_a$ and $\mathbf{q}_{b_k}$, дискретизируются с высоким разрешением Nh в соответствии с (3) и для каждой дискретной конфигурации робота $\mathbf{d}_k$ выполняется тест столкновения. Если столкновения отсутствуют, то выбирается две новые конфигурации на сетке низкого разрешения в направлении градиента. Если обнаружено столкновение, то соответствующее значение весового коэффициента сети T_{ab_k} устанавливается в нуль. Далее потенциальное поле ϕ_a ($a = 1 : N^n$) перерассчитывается, и процесс поиска траектории в направлении градиента повторяется. Цикл поиска траектории повторяется до тех пор, пока траектория найдена, либо установлено, что на текущем разрешении сетки дискретизации траектории не существует. В этом случае разрешение сетки увеличивается и поиск повторяется. Разрешение сетки дискретизации увеличивается до тех пор, пока траектория найдена, либо максимально допустимое разрешение достигнуто.

Национальная академия наук Беларуси

Исследование эффективности метода. Исследование эффективности предложенного метода выполнялось в среде САПР ROBOMAX. Алгоритм планирования реализован на языке программирования C++ и интегрирован в данную САПР. Тестирование разработанного программного обеспечения проводилось на ЭВМ с тактовой частотой процессора 3 ГГц. В качестве объекта использовалась роботизированная ячейка, включающая робот-манипулятор KR125, оснащенный сварочными клещами, свариваемую деталь (деталь кабины автомобиля ГАЗель), кондукторную плиту и технологическую оснастку (рис. 3, *а*, *в*).

В качестве препятствий в данном случае рассматриваются сварная конструкция, технологическая оснастка, а также кондукторная плита. Для поиска свободной от столкновений траектории между конфигурациями $\mathbf{q}_{s1} = [-70\ 57\ -80\ 0\ 2\ 0]^T$ и $\mathbf{q}_{sg} = [-50\ 0\ 160\ 0\ 10\ 0]^T$ и конфигурациями $\mathbf{q}_{s1} = [-100\ 3\ -10\ 0\ 2\ 0]^T$ и $\mathbf{q}_{sg} = [10\ -100\ 100\ 0\ 10\ 0]^T$ (рис. 3, *б*, *г*) были использованы нейронные сети с количеством нейронов N^3. Для различных значений параметра дискретизации N экспериментально было определено количество тестов столкновений и приблизительное время вычислений (таблица). Из данных таблицы видно, что алгоритм сходится за приемлемое для практики время: 0,47 с, 26,51 с, 134,6 с при дискретности конфигурационного пространства 8000, 25000 и 1000000 узлов соответственно.

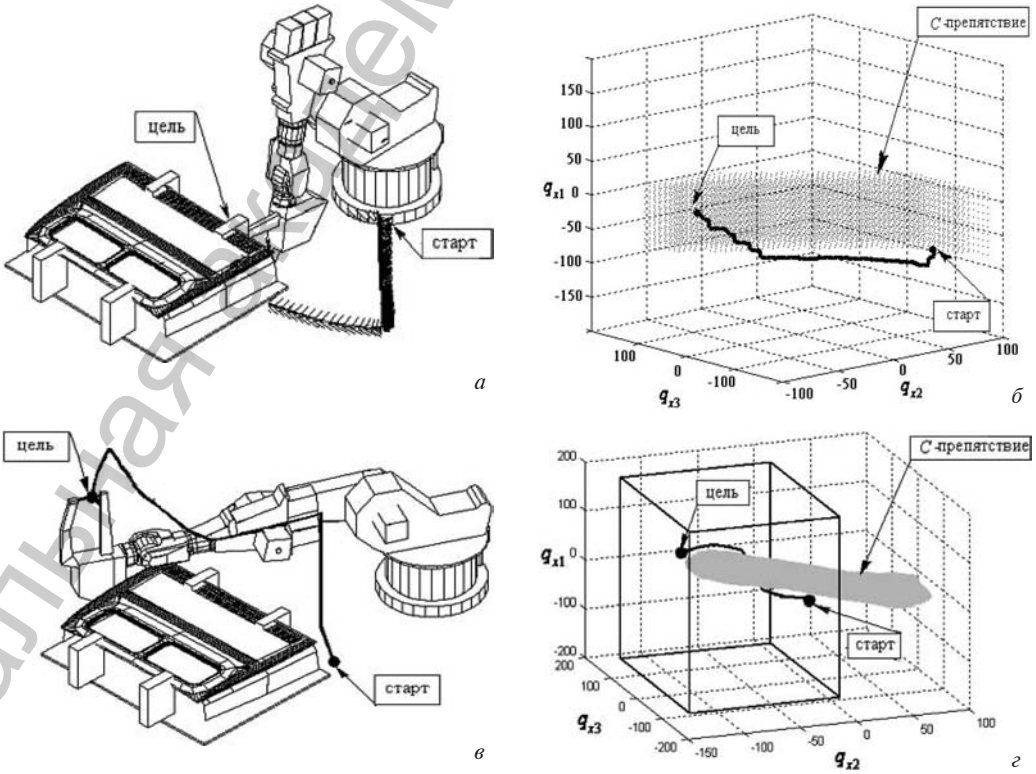

Рис. 3. Свободная от столкновения траектория между конфигурациями $\mathbf{q}_{s1} = [-70\ 57\ -80\ 0\ 2\ 0]^T$ и $\mathbf{q}_{sg} = [-50\ 0\ 160\ 0\ 10\ 0]^T$ (*а, б*); $\mathbf{q}_{s1} = [-100\ 3\ -10\ 0\ 2\ 0]^T$ и $\mathbf{q}_{sg} = [10\ -100\ 100\ 0\ 10\ 0]^T$ (*в, г*)

Национальная академия наук Беларуси

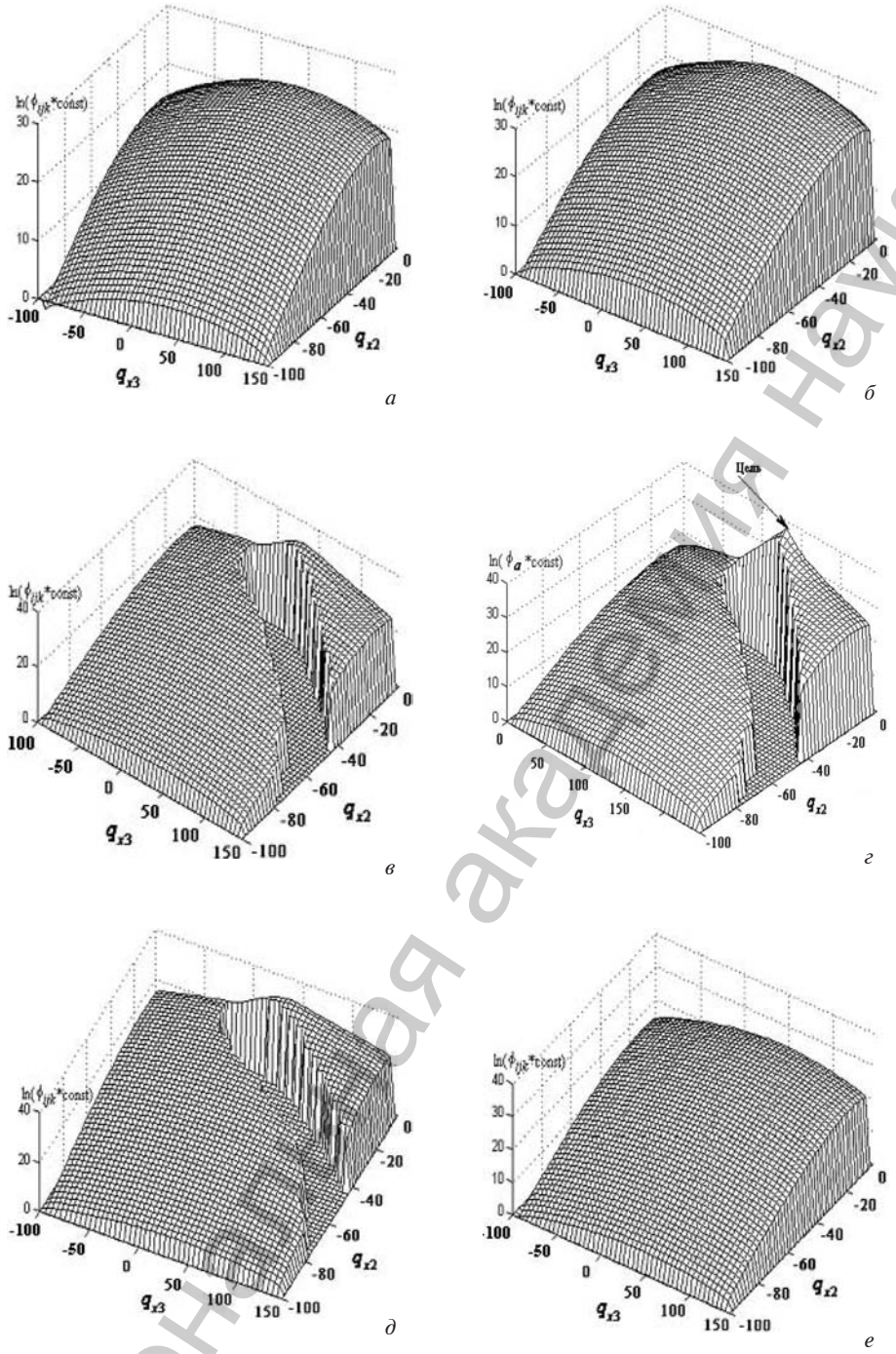

Рис. 4. Потенциальное поле робота-манипулятора KR 125 для различных значений углов в первом сочленении: $q_{x1} = 100°$ (*а*) $q_{x1} = 50°$ (*б*) $q_{x1} = —10°$ (*в*) $q_{x1} = —50°$ (*г*), $q_{x1} = —100°$ (*д*), —150° (*е*)

Национальная академия наук Беларуси

Время генерации траектории при различных значениях параметра дискретизации

Параметр дискретизации N	Количество тестов столкновения	Время генерации вектора V_a, с	Время генерации потенциального распределения, с	Время градиентного поиска, с
20	8000	0,15	0,3	0,02
50	25000	4,1	22,3	0,11
100	1000000	12,2	122,2	0,23

Исследована сходимость разработанного алгоритма. На рис. 4 показаны примеры потенциальных распределений для различных значений q_{x1} при размерности сетки дискретизации 50 × 50 × 50. Анализ полученных поверхностей потенциального распределения показывает, что полученное потенциальное распределение унимодально, и в каждом сечении максимальное значение потенциала имеет узел, ближайший к целевому, причем максимальное значение потенциала достигается на целевом узле. Также исследование сходимости алгоритма показало, что для сетей с размерностями 20 × 20 × 20, 50 × 50 × 50, 100 × 100 × 100 состояние равновесия достигается после $6{,}4 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^7$, $8 \cdot 10^7$ итераций соответственно.

На основе полученных траекторий сформированы технологические программы на языке программирования робота SRCL (Siemens Robot Control Language). Тестирование этих программ в подсистеме off-line программирования САПР ROBOMAX показало, что она обеспечивает свободное от столкновения движение манипулятора. Таким образом, анализ результатов данных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый подход эффективен при планировании траекторий в сборочно-сварочном РТК.

Заключение. Предложен новый метод планирования траекторий роботов-манипуляторов в рабочей среде с препятствиями, основанный на детерминистической дискретизации конфигурационного пространства, обеспечивающей свойство «полноты» решения. В отличие от известных этот метод учитывает сложную форму препятствий, характерную для сборочно-сварочных роботизированных комплексов. Предложенный подход основан на топологически упорядоченной нейронной сети, которая моделирует весовую функцию, характеризующую расположение робота-манипулятора относительно препятствий.

Эффективность предложенного метода планирования подтверждается результатами тестирования в среде САПР ROBOMAX.

Статья подготовлена в рамках проекта Т09М-085, финансируемого Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований.

Литература

1. Choset H., Lynch K. M., Hutchinson S. et al. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. Boston, 2005. — 680 p.

2. Kavraky L. E., Svestka P., Latombe J. C., Overmars M. K. // IEEE Transaction on Robotics and Automation. 1996. Vol. 12(4). P. 556—580.

3. Amato N. M., Bayazit O. B., Dale L. K. et al. Robotics: The Algorithmic Perspective. Natick, 1998. P. 155—168.

4. Amato N. M., Bayazit O. B., Dale L. K. et al. // IEEE Transaction on Robotic and Automation. 2000. Vol. 16(4). P. 442—447.

5. Bohlin R., Kavraky L. E. Handbook on Randomised Computation. Boston, 2001. P. 221—249.

Национальная академия наук Беларуси

6. H s u D. Randomized Single-Query Motion Planning in Expansive Spaces. Stanford, 2000. — 134 p.
7. S u c a n I. A., K a v r a k i L. E. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, 2009. P. 2434—2439.
8. H a u s e r K., L a t o m b e J. C. ICAPS09 Workshop on Bridging the Gap between Task and Motion Planning. Thessaloniki, 2009. P. 19—23.
9. L a V a l l e S. M., K u f f n e r J. J. Algorithmic and Computational Robotics: New Directions. Wesley, 2001. P. 293—308.
10. G e r a e r t s R. J., O v e r m a r s M. H. Algorithmic Foundations of Robotics V. Berlin, 2003. P. 43—58.
11. L a V a l l e S. M., B r a n i c k y M., L i n d e m a n n S. R. // International J. of Robotic Research. 2004. Vol. 23(7/8). P. 673—692.
12. B r a n i c k y M., L a V a l l e S. M., O l s e n K., Y a n g L. Proceedings of IEEE International Conference on Robotic and Automation. Seoul, 2001. P. 1481—1487.
13. E r i c k s o n L. H., L a V a l l e S. M. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, 2009. P. 2068—2073.
14. K n e p p e r R. A., M a s o n M. T. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, 2009. P. 3260—3265.
15. Y e r s h o v a A., L a V a l l e S. M., M i t c h e l l J. C. Algorithmic Foundation of Robotics VIII. Berlin, 2009. P. 385—399.
16. R o s e l l J., I n i g u e z P. Proceedings of the 16th IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, 2003. P. 382-387.
17. G l a s i u s R., K o m o d a A., G i e l e n S. // Neural Networks. 1995. Vol. 8(1). P. 125—133.
18. G l a s i u s R., K o m o d a A., G i e l e n S. // Biological Cybernetics. 1996. Vol. 8(4). P. 511—520.
19. B u g m a n n G., T y l o r J. G., D e n h a m M. J. Neural Networks. Henley on Thames, 1995. P. 217—230.
20. A l t h o e f e r K. Neuro-Fuzzy Motion Planning. London, 1996. — 150 p.
21. Y a n g S. X., M e n g M. // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 2001. Vol. 31(3). P. 302—318.
22. П а ш к е в и ч А. П., К о ж е в н и к о в М. М. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. № 4. С. 78—81.
23. P a s h k e v i c h A., K a z h e u n i k a u M., R u a n o A. E. // International J. of Systems Science. 2006. Vol. 37(8). P. 555—564.
24. S a t o K. // Advanced Robotics. 1993. Vol. 7(5). P. 449—461.

M. M. KAZHEUNIKAU, M. I. ULYANAU, S. M. SUBACH

TRAJECTORY PLANNING FOR INDUSTRIAL ROBOTIC MANIPULATORS USING NEURAL NETWORK

Summary

A new method is proposed for trajectory planning of robotic manipulators in the workspace with obstacles, which is based on topologically ordered neural network. This method takes in to account highly-irregular obstacles shape of industrial robotic cells and provides a reduced number of collision checking.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 577.152.1 547.92

А. Г. СЫСА, П. А. КИСЕЛЕВ, В. Н. ЖАБИНСКИЙ, В. А. ХРИПАЧ

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРА—ФУНКЦИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ АНТИПРОЛИФЕРАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ БРАССИНОСТЕРОИДОВ В ОТНОШЕНИИ РАКОВЫХ КЛЕТОК МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ MCF-7

Институт биоорганической химии НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 04.01.2011)

В работе исследован ряд природных фитогормонов, различающихся строением стероидного скелета и боковой цепи, а также синтетические стереоизомеры некоторых брассиностероидов. Впервые установлено, что брассиностероиды могут выступать в роли регуляторов монооксигеназной активности в опухолевых клетках, и продемонстрирована взаимосвязь между ингибиторной эффективностью и структурой фитогормонов. Одним из положительных эффектов подобной модификации может быть антиканцерогенное действие синтетических аналогов брассиностероидов.

Введение. Природные фитогормоны брассиностероиды (БС) содержатся в каждой растительной клетке, служат для поддержания в норме защитных систем растений, особенно в стрессовых ситуациях: пониженные температуры, заморозки, засуха, болезни, действие пестицидов, засоление почвы и т. д. [1]. Они играют существенную роль в модуляции роста и дифференцировке клеток, действуя в нано- и микромолярных концентрациях [2]. В последнее время появились сообщения об антипролиферативной и потенциальной антиканцерогенной активности брассиностероидов, проявляемой на фоне их очень низкой токсичности [3]. Тем не менее, исследования по влиянию БС на протекание биохимических процессов у животных находятся на начальном этапе и не позволяют сделать обоснованные выводы ни о молекулярных механизмах их потенциального влияния, ни о взаимосвязи структура—функция в отношении предполагаемой антиканцерогенной активности.

Ранее нами было показано, что брассиностероиды способны оказывать влияние на монооксигеназы микросом печени крыс [4]. Известно, что некоторые ферменты монооксигеназной системы, например, фермент цитохрома CYP1A1, осуществляют в клетке метаболическую активацию ксенобиотиков [5]. Нередко, однако, промежуточные продукты биотрансформации, особенно на начальных этапах, могут быть весьма токсичными, обнаруживать более выраженную мутагенную, канцерогенную и даже тератогенную активность по сравнению

Национальная академия наук Беларуси

с нативными ксенобиотиками и вследствие этого быть причиной различных патологических состояний и болезней, вплоть до малигнизации. Кроме того, в настоящее время для многих форм рака описано появление мутаторного фенотипа у клеток злокачественных новообразований, основной причиной которого считают мутационные нарушения ферментных систем [6].

Цель работы — анализ взаимосвязей между структурой брассиностероидов и их влиянием на пролиферативную активность в эстрогензависимой опухоли молочной железы.

Материалы и методы исследования. Монослойную клеточную культуру MCF-7 культивировали в среде RPMI-1640, содержащей 10 % эмбриональной телячьей сыворотки, 4 мМ L-глютамина, 100 ед/мл пенициллина и 100 мкг/мл стрептомицина, при 37 °С во влажной атмосфере с 5 % CO_2. Клеточная культура поддерживалась на стадии логарифмического роста путем рутинного субкультивирования трижды в неделю.

Для МТТ-теста в каждую лунку 96-луночного планшета вносили $1 \cdot 10^3$ клеток и инкубировали 24 ч при 37 °С в темноте во влажной атмосфере с 5 % CO_2 для адгезии клеток на дне лунки. Далее добавляли брассиностероиды в концентрации от 5,0 мкМ до 500 мкМ (n = 10). Для каждой концентрации брассиностероидов был приготовлен ряд последующих разведений с конечной концентрацией ДМСО <1,0 %. После 24-часовой инкубации при 37 °С в темноте во влажной атмосфере с 5 % CO_2 в каждую лунку платы с клеточной культурой вносили 20 мкл раствора МТТ (5 г/л) и инкубировали на протяжении 4 ч при 37 °С в темноте во влажной атмосфере с 5 % CO_2. По окончании инкубации супернатант осторожно удаляли, а в каждую лунку добавляли по 200 мкл ДМСО. Осадок ресуспендировали и 15 мин инкубировали в темноте при комнатной температуре. Показания оптической плотности считывали на ИФА-ридере при 492 нм.

Для индукции CYP450 в клеточной линии MCF-7 использовали 10 нМ раствора 2,3,7,8-тетрахлородибензо-*р*-диоксина (ТХДД) в диметилсульфоксиде (объем растворителя не превышал 0,1 %). Индукцию начинали проводить при 70—80 % конфлуентности флакона. Для этого питательную среду меняли на свежую, не содержащую сыворотки крупного рогатого скота (КРС), затем во флакон добавляли сыворотку КРС с предварительно растворенным в ней диоксином. Индукцию проводили в течение 72 ч.

Окислительное деэтилирование 7-этоксирезоруфина (ЭРОД) проводили по методу [7] при 37 °С в 200 мкл буферного раствора (50мМ Трис-HCl, 100мМ NaCl, 1мМ ЭДТА, pH 7,4), содержащего клеточный лизат. Реакцию начинали добавлением НАДФН$^+$, проводили в течение 10 мин и останавливали добавлением 200 мкл метанола, охлажденного до 4 °С. Концентрацию продукта определяли спектрофлуориметрически при длине волны возбуждения 530 нм и длине волны испускания 590 нм.

Результаты и их обсуждение. Основой для получения сведений о принципиальной роли структуры боковой цепи БС в регулировании монооксигеназной активности стали природные соединения (24-эпи- и 28-гомобрассинолиды и 24-эпи- и 28-гомокастастероны) и два синтетических производных брассинолидов (22S,23S-дигидрокси-стереоизомеры брассиностероидов) (рис. 1).

Национальная академия наук Беларуси

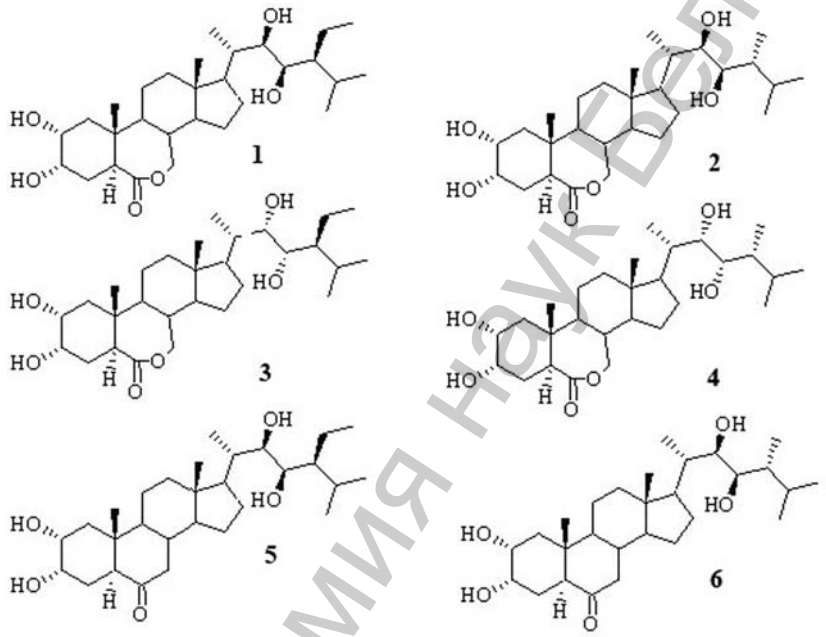

Рис. 1. Структура исследованных в работе брассиностероидов: *1* — 28-гомобрассинолид, *2* — 24-эпибрассинолид, *3* — (22S,23S)-28-гомобрассинолид, *4* — (22S,23S)-24-эпибрассинолид, 5 — 28-гомокастастерон, 6 — 24-эпикастастерон

Указанные фитостероиды получены в соответствии с [10—12].

Для характеристики влияния на организм человека и животных брассиностероидов и, в частности, для выявления возможной значимости в этом процессе структурных особенностей фитогормонов использована биохимическая модель — монооксигеназная система клеточной линии MCF-7. Известно, что культивирование клеток MCF-7 в присутствии TCDD приводит к индукции цитохромов CYP1A1 и CYP1B1. Широко используемым субстратом, надежно характеризующим каталитическую активность данных изоформ цитохрома P450, считается 7-этоксирезоруфин [8], поэтому в качестве тестовой была использована реакция окислительного деалкилирования 7-этоксирезоруфина. Оценка влияния брассиностероидов на реакцию окисления 7-этоксирезоруфина монооксигеназной системой клеточной линии MCF-7 показана на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в концентрациях до 100 мкМ брассиностероиды не влияют на скорость окисления 7-этоксирезоруфина монооксигеназной системой клеточной линии MCF-7 (различия не достоверны). В концентрациях 100 мкМ и выше соединения с 6-кетофункцией в кольце B повышают уровень микросомального окисления в трансформированных клетках. Так, в присутствии 250 мкМ концентрации 28-гомокастастерона скорость окисления 7-этоксирезоруфина увеличивается почти в 1,5 раза.

Также следует отметить более высокую эффективность SS-изомеров брассинолидов. Так, добавление (22S,23S)-24-эпибрассинолида в концентрации более 100 мкМ приводит хотя и к незначительному (на 5 %), но увеличению

Национальная академия наук Беларуси

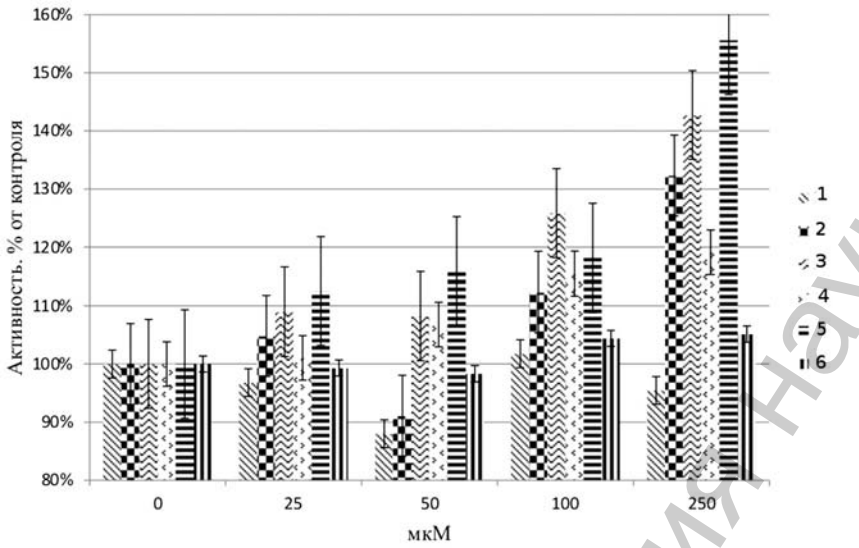

Рис. 2. Зависимость скорости окисления 7-этоксирезоруфина монооксигеназной системой клеточной линии MCF-7 в присутствии брассиностероидов. Начальная концентрация 7-этоксирезоруфина – 2,0 мкМ

скорости окисления 7-этоксирезоруфина. Отметим значительный рост скорости ферментативной реакции (в 1,3—1,5 раза) при добавлении 28-гомобрассинолида и его стереоизомера (22S,23S)-28-гомобрассинолида — в 250 мкМ концентрации.

Проведена также оценка влияния брассиностероидов на индукцию ферментов CYP450 (в основном CYP4501A1 и CYP4501B1) в опухолевых клетках (на примере аденокарциномы молочной железы). В качестве тестовой реакции была использована реакция окисления 7-этоксирезоруфина.

Для оценки эффективности ферментативного процесса окисления 7-этоксирезоруфина рассчитан коэффициент эффективности катализа, равный отношению максимальной скорости реакции к константе Михаэлиса (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что разница между эффективностью окисления 7-этоксирезоруфина монооксигеназной системой клеточной линии MCF-7 после индукции диоксином без добавления брассиностероидов и в присутствии 24-эпибрассинолида и 28-гомокастастерона статистически незначима. Отметим значительное снижение (более 60 %) эффективности каталитической реакции окисления 7-этоксирезоруфина монооксигеназной системой клеточной линии MCF-7 после индукции диоксином в присутствии (22S,23S)-изомера природного 24-эпибрассинолида. Подобные изменения каталитического профиля реакции можно отнести на влияние брассиностероидов на индукцию монооксигеназ в клеточной линии MCF-7.

Зависимости, характеризующие антипролиферативную активность брассиностероидов, показаны на рис. 4. Из рис. 4 следует, что в целом соединения с 6-кетофункцией в кольце B являются более активными в подавлении клеточной пролиферации, чем соединения с 6-оксо-7-оксалактонной функцией.

Национальная академия наук Беларуси

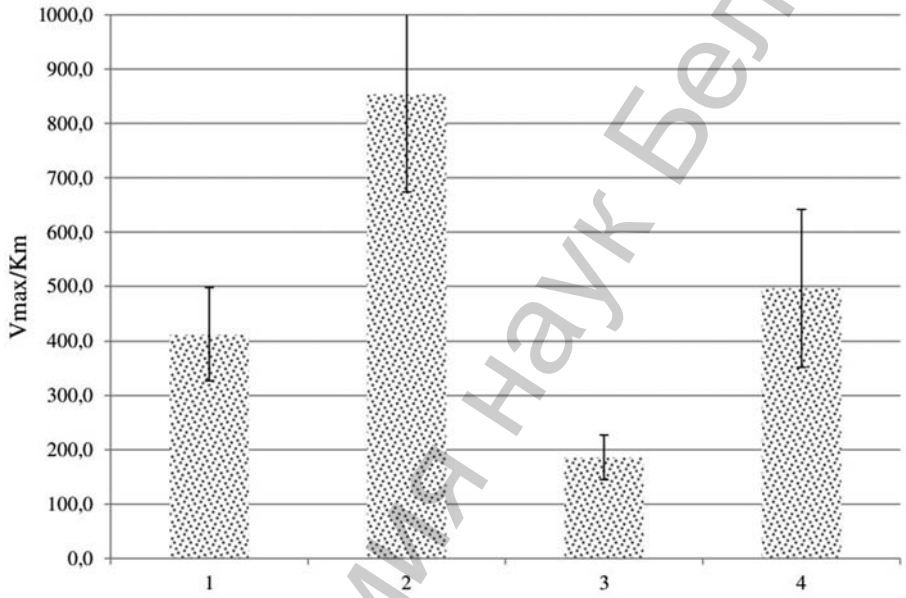

Рис. 3. Эффективность окисления 7-этоксирезоруфина монооксигеназной системой клеточной линии MCF-7 после индукции диоксином в присутствии: *1* — 24-эпибрассинолида, *2* — 28-гомокастастерона, *3* — (22S,23S)-24-эпибрассинолида, *4* — без брассиностероидов

Так, IC_{50} для 28-гомокастастерона и 24-эпикастастерона составили 45 мкМ и 100 мкМ соответственно. IC_{50} (22S,23S)-24-эпибрассинолида оказалась в 5 раз меньше аналогичного значения для (22R,23R)-изомера и составила 80 мкМ.

В последние годы появились данные о том, что 28-гомокастастерон и 24-эпибрассинолид влияют на жизнеспособность опухолевых клеток лейкемии (линия CEM) и миеломы (линия RPMI 8226) [9]. Брассиностероид 28-гомокастастерон оказывает наибольший цитотоксический эффект по отношению к CEM (IC_{50} составляет 13 мкМ), в то время как его 22S,23S-изомер является сильнейшим цитостатиком по отношению к линии RPMI 8226 (IC_{50} составляет 25 мкМ). Наряду с 28-гомокастастероном высокая цитотоксичность также наблюдается в случае природного кастастерона и его искусственного SS-изомера.

Следует отметить, что наиболее активный фитогормон в растениях брассинолид обладает практически нулевой цитостатической активностью, в то время как искусственный 22S,23S-28-гомобрассинолид является одним из самых эффективных в подавлении клеточного роста (IC_{50} составляет 31—35 мкМ). Исследования цитотоксических свойств небрассиностероидных фитостероидов (холестерин, стигмастерол, брассикастерол, 5α-холестан, β-экдизон, β-ситостерол) показывают, что указанные соединения даже в концентрациях более 50 мкМ являются неэффективными. Лишь некоторые из фитостероидов: холестерин, стигмастерол и β-ситостерол проявляют минимальную антираковую активность по отношению к клеточной линии на RPMI 8226 (IC_{50} > 30 мкМ) [9].

Национальная академия наук Беларуси

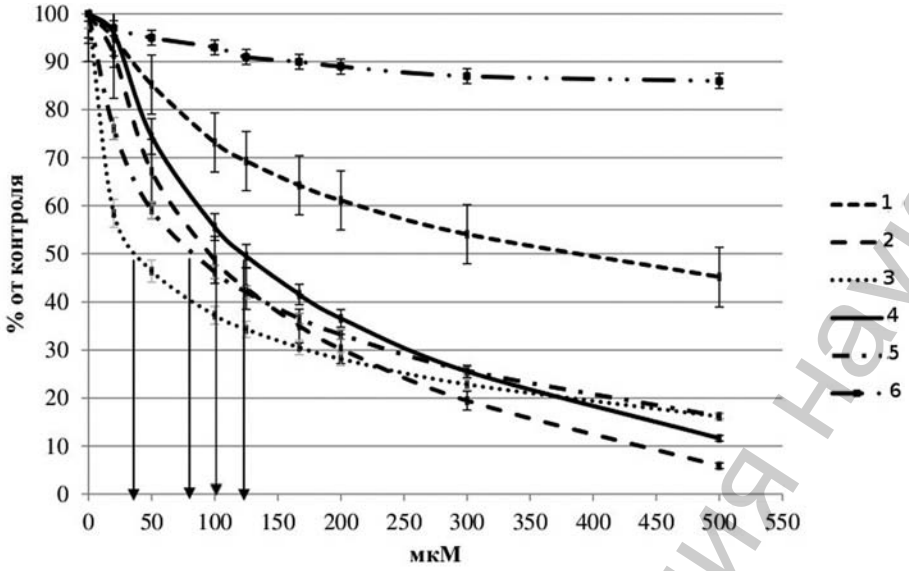

Рис. 4. Влияние брассиностероидов на пролиферацию раковых клеток (линия MCF-7): *1* — 24-эпибрассинолид, *2* — 28-гомобрассинолид, *3* — 28-гомокастастерон, *4* — 24-эпикастастерон, *5* — (22S,23S)-28-гомобрассинолид, *6* — (22S,23S)-24-эпибрассинолид

Следует отметить, что как брассиностероиды, так и структурно родственные полиоксистероиды не оказывают никакого цитотоксического влияния на раковые клетки хронической миелоидной лейкемии (линия K562), легочной карциномы (линия A549), шейки матки (линия HeLa), остеосаркомы (линия HOS). Подчеркнем, что брассиностероиды не оказывают влияния на нормальные человеческие фибробласты (линия BJ). Указанные результаты позволяют сделать вывод о различных механизмах влияния фитостероидных гормонов на раковые клетки и нормальные.

Анализ взаимосвязи между структурой брассиностероидов и их цитотоксической активностью показывает, что самым цитотоксичным по отношению к раковым клеткам является 28-гомокастастерон. Изменение структуры стероидного скелета с 6-оксо-7-оксалактона на 6-оксо значительно увеличивает способность брассиностероидов к подавлению клеточного роста. Так, 28-гомокастастерон приблизительно в 3 раза более эффективно подавляет опухолевый рост, чем 28-гомобрассинолид. Другой важной обнаруженной особенностью зависимости структура—активность является тот факт, что соединения с этильной группой в положении C24 (28-гомокастастерон и 28-гомобрассинолид) являются более цитотоксичными, чем их соответствующие аналоги с метильной группой в указанном положении боковой цепи. Следует отметить, что наличие одной или более α-ориентированных гидроксильных групп в цикле A является необходимым условием для проявления противоопухолевой активности. Это следует из нулевой эффективности β-экдизона, который их не содержит, в то время как стероидные 3α-гидроксипроизводные, а также 2α, 3α- и 3α, 4α-диолы в аналогичных условиях обладают противоопухолевой активностью [9].

Национальная академия наук Беларуси

Как наши данные, так и результаты [9] подтверждают, что брассиностероиды подавляют пролиферацию раковых клеток, по меньшей мере, молочной железы и простаты.

Антипролиферативная активность брассиностероидов может быть связана с их влиянием на монооксигеназные процессы, происходящие в трансформированных клетках, а именно, с влиянием на изоформы цитохрома P450, ответственные в организме за биоактивацию ксенобиотиков. В данном случае более активными являются соединения с 6-кетофункцией в кольце B стероидного скелета и с этильным заместителем в положении C24, если речь идет о различиях в структуре боковой цепи. Стереоизомеры фитогормонов по положениям C22 и C23 и в этом случае значительно более активны, чем их природные аналоги.

На данный момент нельзя сделать определенных выводов о том, являются ли гормонзависимые опухоли более чувствительными к действию брассиностероидов, а также взаимодействуют ли брассиностероиды с эстрогеновыми рецепторами в опухолевых клетках. Результаты проведенного исследования показывают возможность направленной модификации природных соединений с целью достижения необходимых физиологических эффектов. В частности, потенциально эффективными могут быть соединения (22S,23S)-24-эпикастастерон и (22S,23S)-28-гомокастастерон, в которых присутствует как 6-кетофункция в кольце B, так и (22S,23S)-диольная функция боковой цепи.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X08MC-013).

Литература

1. Khripach V. A., Zhabinskii V. N., de Groot A. E. Brassinosteroids: a new class of plant hormones. San Diego, 1999. — 243 p.

2. Miyazawa Y. // J. Exp. Bot. 2003. Vol. 54. P. 2669—2678.

3. Malikova J., Swaczynova J., Kolar Z., Strnad M. // Phytochemistry. 2008. Vol. 69, № 2. P. 418—426.

4. Сыса А. Г., Киселев П. А., Жабинский В. Н., Хрипач В. А. // Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 6. С. 59—62.

5. Wei P. // Cancer Res. 1996. Vol. 56. P. 3975—3979.

6. Копнин Б. П. // Практическая онкология. 2002. Т. 3, № 4. С. 229—235.

7. Omura T., Sato R. // J. Biol. Chem. 1964. Vol. 239, № 6. P. 2379—2385.

8. Ляхович В. В., Цырлов В. В. Индукция ферментов метаболизма ксенобиотиков. Новосибирск, 1981. — 240 с.

9. Natural brassinosteroids for use for treating hyperproliferation, treating proliferative diseases and reducing adverse effects of steroid dysfunction in mammals, pharmaceutical composition and its use: pat. AC07J1700FI / C07J 73/00 A61K 31/575 A61K 31/58 A61P 35/04 C07D 313/10 C07J 17/00 C07J 9/00 / M. Strnad, J. Oklestkova, L. Hoffmannova, J. Steigerova, L. Kohout, Z. Kolar ; app. Ustav organicke chemie a biochemie akademie ved Ceske Republiky, V.V.I. — № 20100204460; fil. 20.08.08; pub. 26.02.09 // The World Intellectual Property Organization (WIPO) [Electronic resource].

10. Хрипач В. А., Жабинский В. Н., Иванова Г. В., Ольховик В. К. // Весці АН Беларусі. Сер. хім. навук. 1992. № 1. С. 70—72.

11. Ахрем А. А., Лахвич Ф. А., Хрипач В. А. и др. // Докл. Академии наук СССР. 1985. Т. 283. С. 130—133.

12. Ахрем А. А., Хрипач А. А., Жабинский В. Н., Ольховик В. К. // Весці АН БССР. Сер. хім. навук. 1989. № 2. С. 69—73.

Национальная академия наук Беларуси

A. G. SYSA, P. A. KISSELEV, V. N. ZHABINSKII, V. A. KHRIPACH

STRUCTURE-FUNCTION RELATIONSHIP OF AN ESTIMATION ANTIPROLIFERATIVE ACTIVITY OF BRASSINOSTEROIDS CONCERNING CANCER CELLS MCF-7

Summary

A number of the natural phytohormones and their synthetic stereosimers was investigated. It was estimated for the first time that brassinosteroids could act as regulators of monooxigenase activity in tumor cells, and the interrelation between inhibitor efficiency and structure of phytohormones was shown. Anticancerogenic action of synthetic analogues of brassinosteroids could be as positive effects of similar updating.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 539.2; 548:537.611.44

С. Ф. МАРЕНКИН[1], И. В. ФЕДОРЧЕНКО[1], А. В. КОЧУРА[2], В. М. ТРУХАН[3], Л. С. ЛОБАНОВСКИЙ[3], Т. В. ШЁЛКОВАЯ[3]

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ InSb—MnSb

[1]Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН
[2]Курский государственный технологический университет
[3]Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению

(Поступила в редакцию 06.01.2011)

Для устройств спинтроники необходимы магнитные материалы, способные осуществлять инжекцию поляризованных по спину электронов в полупроводник. Известные ферромагнетики из-за структурного несоответствия не эффективны. В настоящее время рассматриваются полупроводники, допированные d-элементами. Однако из-за низкой растворимости d-элементов не удается получить ферромагнетики с высокими температурами Кюри. Наши предварительные исследования сплавов InSb с марганцем, полученных при высоких скоростях охлаждения, показали, что они являются ферромагнетиками с температурой Кюри ~580 K. Ферромагнетизм этих сплавов определяли нанокластеры MnSb. Для обеспечения постоянства состава и воспроизводимости свойств было предложено использовать эвтектику системы InSb—MnSb и провести ее направленную кристаллизацию, чтобы получить композицию, состоящую из матрицы InSb и игольчатых включений MnSb. Комплексом методов физико-химического анализа показано, что InSb с MnSb образует эвтектику с координатами 6,5 молл. % MnSb и $T_{пл}$ = 513 °C. Методом Бриджмена выращена композиция, состоящая из монокристаллической ориентированной по направлению [001] матрицы InSb и ограненных монокристаллических включений MnSb размерами 1 мкм² в сечении и длиной ~20 мкм. Композиция обладала ферромагнитными свойствами с температурой Кюри ~580 K и рассматривалась как материал подложек для эпитаксии InSb.

Введение. В устройствах спинтроники в качестве рабочего элемента рассматривается не только заряд, но и спин электрона. Управление спином требует заметно меньше энергии, чем управление зарядом электрона, что позволяет качественно повысить возможности существующих приборов и создать принципиально новые устройства твёрдотельной электроники. Для создания

Национальная академия наук Беларуси

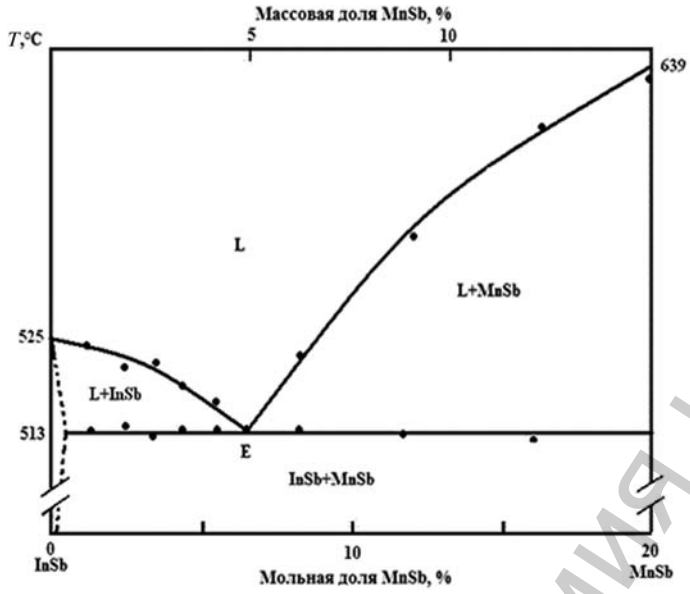

Рис. 1. Диаграмма состояния системы InSb—MnSb

таких устройств нужны материалы, обеспечивающие эффективную инжекцию спинполяризованных электронов в полупроводник. Такие материалы должны быть ферромагнетиками с температурой Кюри выше комнатной и структурно совместимые с основными полупроводниками. В настоящее время материалов, удовлетворяющих полностью таким требованиям, нет. В качестве наиболее перспективных рассматриваются полупроводники группы $A^{III}B^{V}$, легированные Mn (разбавленные магнитные полупроводники). Они обладают как магнитными, так и полупроводниковыми свойствами. Низкая температура перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние — недостаток этих материалов. Температура Кюри в них существенно ниже комнатной. Наши предварительные исследования магнитных и электрических свойств сплавов InSb с Mn [1] показали, что эти сплавы могут быть ферромагнетиками с температурой Кюри ~580 K. Ферромагнетизм в этих сплавах определяли нанокластеры антимонида марганца. Чтобы данные сплавы стали ма-

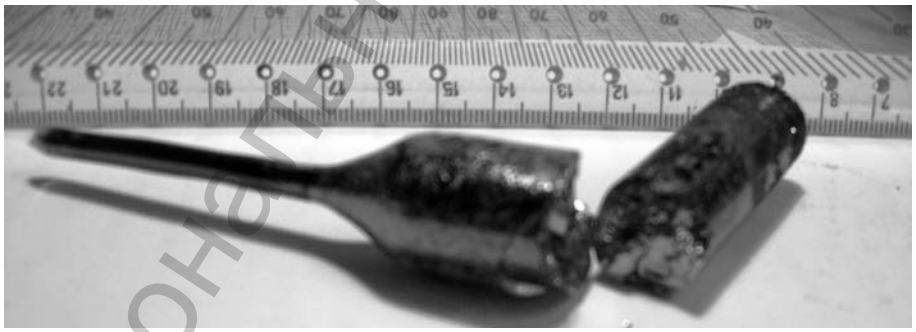

Рис. 2. Внешний вид слитка эвтектической композиции системы InSb—MnSb

Национальная академия наук Беларуси

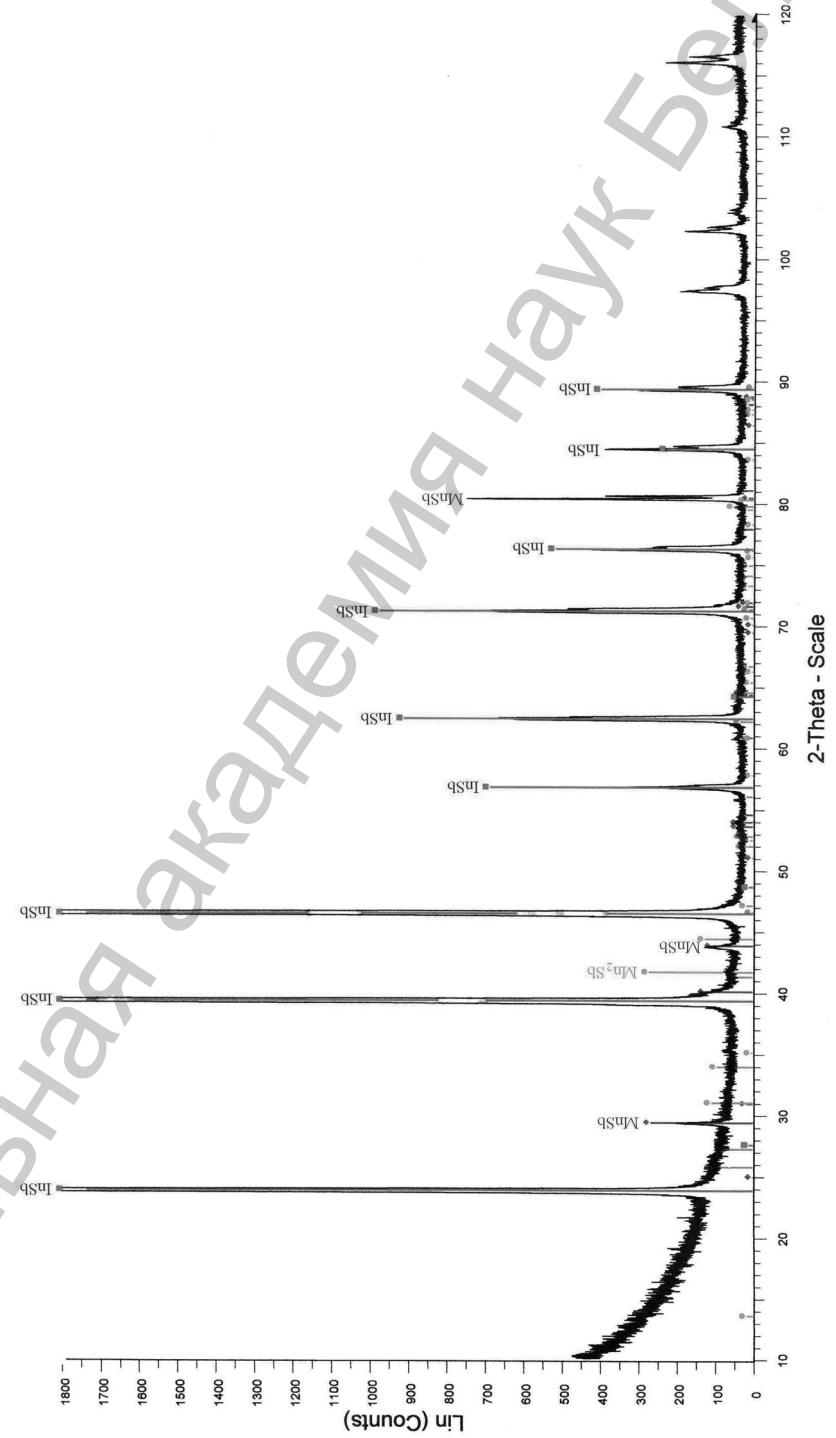

Рис. 3. Дифрактограмма порошка эвтектической композиции системы InSb—MnSb

Национальная академия наук Беларуси

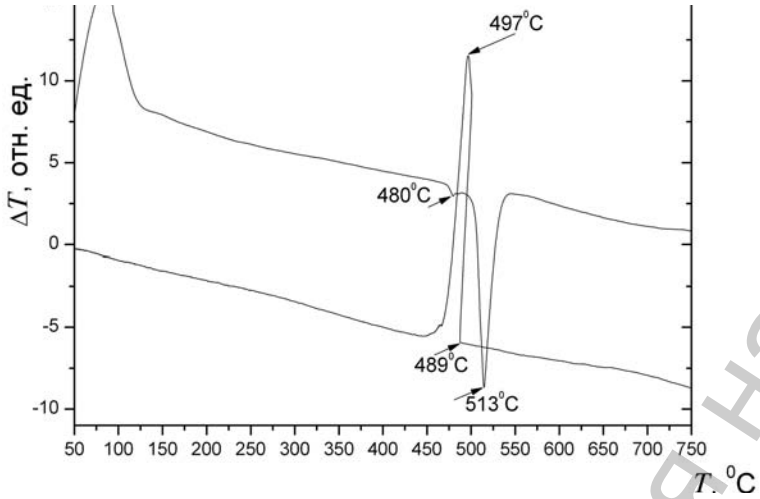

Рис. 4. ДТА эвтектической композиции InSb—MnSb

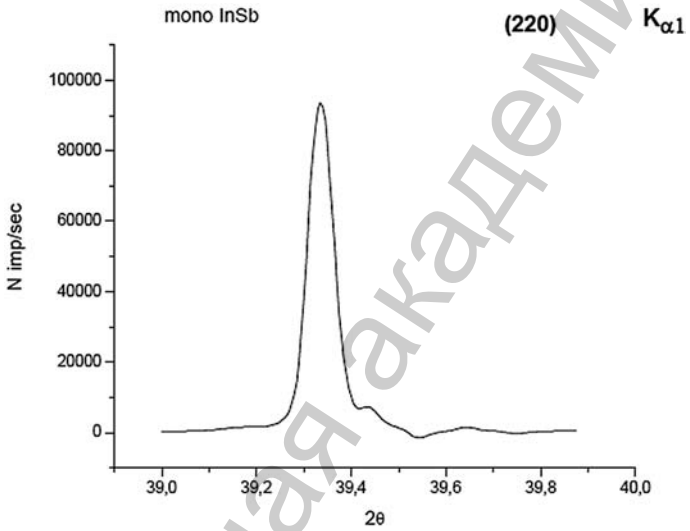

Рис. 5. Дифрактограмма скола эвтектической композиции InSb—MnSb

териалом, пригодным для спинтроники, они должны иметь постоянный состав и определенную структуру, что обеспечивает воспроизводимость их функциональных свойств. Постоянства состава в сплавах InSb с Mn можно достигнуть используя эвтектику, а определенное расположение фаз в структуре эвтектики — путем ее направленной кристаллизации, т. е. созданием эвтектической композиции.

Материалы и методы исследования. Для реализации поставленной цели в настоящей работе был уточнен характер взаимодействия в системе InSb—MnSb и установлены состав, температура и микроструктура эвтектики. Был выбран метод выращивания и определены технологические условия для по-

Национальная академия наук Беларуси

лучения эвтектической композиции, на которой, в широком диапазоне температур и магнитных полей, изучены электрические и магнитные свойства.

Система InSb—MnSb исследована комплексом методов физико-химического анализа и установлено, что она является системой эвтектического типа с координатами эвтектики 6,5 молл. % MnSb и $T_{пл}$ = 513 °С (рис. 1).

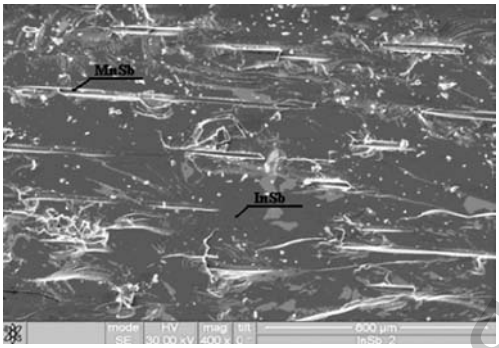

Рис. 6. Микроструктура эвтектической композиции InSb—MnSb.

В качестве основного метода выращивания эвтектической композиции системы InSb—MnSb использован вертикальный метод Бриджмена. Выращивание проводили на установке, описанной в работах [2; 3]. Лучшие по качеству образцы получены при температуре зоны плавления 550 °С, зоны кристаллизации 320 °С и скорости роста 0,5 мм/ч. В качестве шихты использовали порошок, приготовленный из монокристаллического высокочистого антимонида индия, и порошок специально синтезированного антимонида марганца. Состав шихты состоял из 93,5 молл. % InSb и 6,5 молл. % MnSb. Для хорошей гомогенизации перед кристаллизацией расплав шихты интенсивно перемешивали в течение 12 ч.

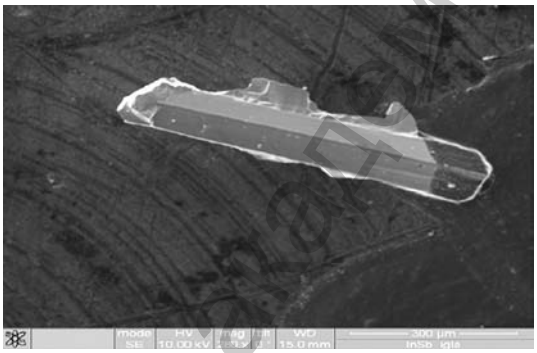

Рис. 7. Внешний вид ограненного игольчатого включения MnSb

Результаты и их обсуждение. Эвтектическая композиция представляла собой слитки диаметром 14—16 мм и длиной 120 мм (рис. 2).

Из дифрактограммы порошка эвтектической композиции (рис. 3) установлены только две фазы InSb и MnSb.

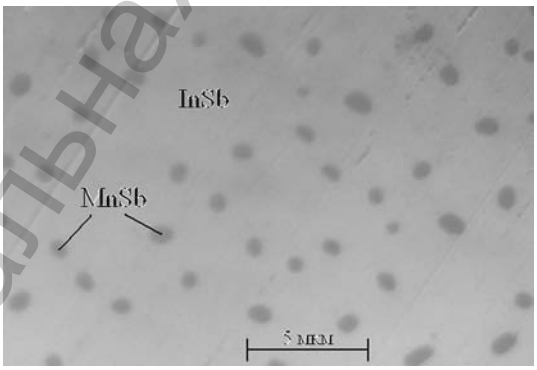

Рис. 8. Микрошлиф образца, вырезанного перпендикулярно направлению роста

Согласно данным ДТА, температура плавления эвтектической композиции системы InSb—MnSb составляла ~513 °С (рис. 4). При кристаллизации расплава эвтектики обнаружены существенные переохлаждения, достигающие ~20°, что необходимо учитывать при отработке технологии получения сплавов эвтектической композиции.

Слитки эвтектикой композиции системы InSb—MnSb хорошо скалывались в направлении, перпенди-

Национальная академия наук Беларуси

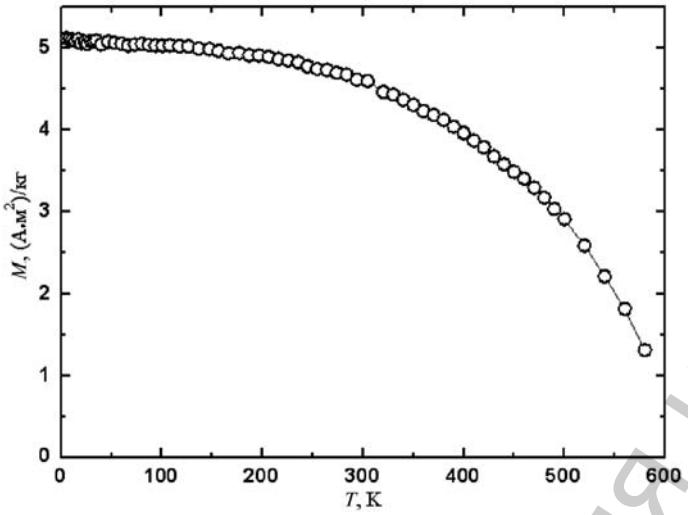

Рис. 9. Температурная зависимость удельной намагниченности образца InSb—MnSb

кулярном направлению роста. На дифракционной картине скола (рис. 5) видно, что эвтектическая композиция представляет собой монокристаллическую матрицу InSb, ориентированную по направлению [110], и игольчатые монокристаллические включения MnSb, ориентированные вдоль [001].

На снимках, сделанных с помощью электронного микроскопа, отчетливо видны игольчатые включения MnSb в матрице антимонида индия (рис. 6). На рис. 7 представлен внешний вид отдельного, ограненного игольчатого включения MnSb, выделенного из массива эвтектической композиции.

Микрошлиф (рис. 8), вырезанный перпендикулярно направлению роста, содержал игольчатые включения MnSb размерами 1 мкм^2 в сечении, длина которых составляла ~20 мкм.

Измерения электрических и магнитных свойств проводили на образцах, которые вырезались из средней части эвтектического слитка. Диапазон температур — 5—580 K, магнитных полей — до 50 кГаус. На рис. 9 представлена температурная зависимость удельной намагниченности. Согласно полученным значениям — эвтектическая композиция InSb—MnSb является ферромагнетиком с температурой Кюри ~580 K.

Измерения полевых зависимостей намагниченности при различных температурах также подтверждают наличие ферромагнитной компоненты. В частности, при температурах 5 и 300 K (рис. 10) на полевых зависимостях удельной намагниченности образцов ярко выражена тенденция к насыщению в сильных магнитных полях. Выше 1 Тл происходит техническое насыщение образцов. Также наблюдается некоторое различие в поведении кривой намагниченности в процессе насыщения для случаев ориентации монокристаллических включений MnSb в матрицу InSb вдоль магнитного поля и перпендикулярно ему. В частности, при низких температурах в магнитных полях 0,4—0,8 Тл различие в наклоне кривых намагниченности значительно. Такое поведение, на наш взгляд, связано с анизотропией магнитных свойств образ-

Национальная академия наук Беларуси

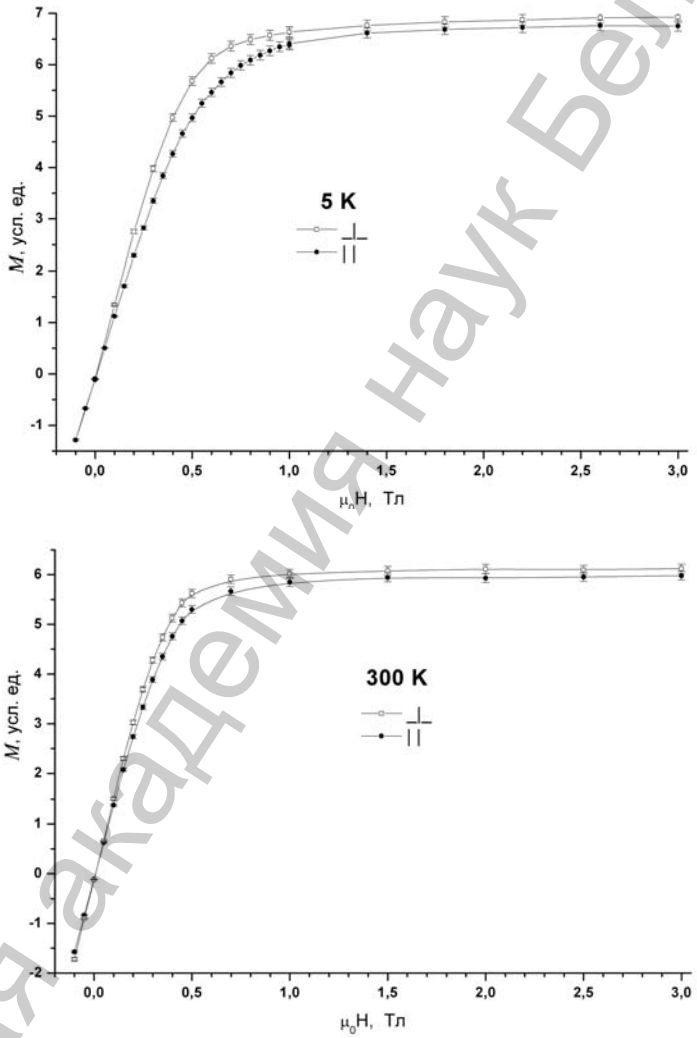

Рис. 10. Зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля при температурах 5, 300 K

ца. В случае параллельного расположения игольчатых включений MnSb в образце относительно магнитного поля, намагничивание происходит преимущественно вдоль оси трудного намагничивания, что выражается в более пологом наклоне кривых удельной намагниченности. Величина намагниченности насыщения одинакова (с точностью до погрешности измерения) при измерении в различной ориентации игольчатых включений MnSb в образце относительно магнитного поля.

Заключение. Представленные результаты исследований показали перспективность применения направленно закристаллизованной эвтектики системы InSb—MnSb в качестве материала подложек при проведении эпитаксии InSb для получения гетероструктур ферромагнетик—полупроводник.

Национальная академия наук Беларуси

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-03-90902 моб снг ст), Президиума РАН (проект № 7П10) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф10Р-012).

Литература

1. Новоторцев В. М., Захаров И. С., Кочура А. В. и др. // Журн. неорган. химии. 2006. Т. 51, № 10. С. 1729—1733.

2. Маренкин С. Ф., Маймасов А. Б., Попов В. А. // Неорган. материалы. 1997. Т. 33, № 4. С. 398—403.

3. Маренкин С. Ф., Раухман А. М., Маймасов А. Б., Попов В. А. // Неорган. материалы. 1997. Т. 33, № 12. С. 1439—1447.

S. F. MARENKIN, I. V. FEDORCHENKO, A. V. KOCHURA,
V. M. TRUKHAN, L. S. LOBANOVSKY, T. V. SHOUKAVAYA

MAGNETIC PROPERTIES OF EUTECTIC COMPOSITION OF InSb-MnSb SYSTEM

Summary

Spintronic devices require magnetic materials capable of injecting spin-polarized electrons into semiconductor. Known ferromagnetic materials due to structural discrepancies are not effective. At present the semiconductors doped with *d*-elements are considered. However, because of the low solubility of *d*-elements into semiconductors, the attempts to obtain the ferromagnetic with high Curie temperature are not succeed. The preliminary experiments with the alloys InSb with manganese, obtained at high cooling rates, hae shown that they are ferromagnetic with a Curie temperature ~580 K. The ferromagnetism of these alloys was determined by nanoclusters MnSb. To ensure consistency and reproducibility of properties the eutectic of system InSb—MnSb was proposed. To obtain the composition consisting of InSb matrix and needle inclusions of MnSb its directional solidification was made. The physico-chemical analysis showed that InSb with MnSb forms the eutectic with the coordinates of 6,5 mol% MnSb and T_m = 512 °C. By Bridgman method the composition was grown consisting of single crystal oriented towards the [001] matrix InSb and faceted single-crystal inclusions of MnSb. These inclusions have sizes 1 μkm^2 in cross section and the length of about 20 mm. The eutectic composition of system InSb—MnSb had the ferromagnetic properties with Curie temperature ~580 K and is treated as the substrate material for epitaxial of InSb.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 634.737:581.19:522.4 (476)

Ж. А. РУПАСОВА, И. М. ГАРАНОВИЧ, Т. В. ШПИТАЛЬНАЯ, Т. И. ВАСИЛЕВСКАЯ, Н. П. ВАРАВИНА, Н. Б. КРИНИЦКАЯ

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ, ТЕРПЕНОИДОВ И УГЛЕВОДОВ В ПЛОДАХ СОРТОВ КИЗИЛА НАСТОЯЩЕГО (*CORNUS MAS.* L.) УКРАИНСКОЙ СЕЛЕКЦИИ ПРИ ИНТРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ БЕЛАРУСИ

ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси»

(Поступила в редакцию 08.10.2010)

Приведены результаты сравнительного исследования в двулетнем цикле наблюдений содержания ряда органических кислот, терпеноидов, растворимых сахаров и пектиновых веществ в плодах природной дикорастущей формы и интродуцированных в условиях Беларуси 5 сортов Cornus mas. L. *украинской селекции (Владимирский, Выдубецкий, Евгения, Лукьяновский и Радость). Установлены отчетливые генотипические различия параметров накопления в них указанных соединений, в значительной степени определявшиеся характером погодных условий в период вегетации растений. Выявлены таксоны Cornus mas.* L. *с наиболее высокой способностью к биосинтезу в плодах данных соединений при лидирующем положении сортов Владимирский и Лукьяновский.*

Введение. Особое место в ряду интродуцентов, являющихся потенциальными объектами лечебного садоводства в Республике Беларусь, занимает малоизученный декоративный кустарник — кизил настоящий (*Cornus mas* L.), плоды и вегетативные органы которого издавна используются в пищевых и медицинских целях, благодаря значительному содержанию в них ряда физиологически активных веществ, что делает их весьма привлекательными для комплексного практического использования, особенно в постчернобыльской ситуации.

В настоящее время коллекция ЦБС НАН Беларуси насчитывает 15 таксонов этого весьма перспективного вида, представленных его природной дикорастущей формой, а также сортами украинской селекции, 5 из которых — Лукьяновский, Владимирский, Евгения, Выдубецкий и Радость успешно прошли первичные интродукционные испытания в условиях опытной культуры в Центральном ботаническом саду НАН Беларуси, что свидетельствует о перспективности их распространения на территории республики и возможности

Национальная академия наук Беларуси

использования в качестве исходной основы для создания отечественных сортов кизила.

Вместе с тем общеизвестно, что селекционный процесс является мощным фактором управления как биологической продуктивностью растений, так и параметрами накопления в их плодах полезных веществ. В связи с этим первостепенную значимость и актуальность в интродукционных исследованиях обретают работы, направленные на выявление в пределах генофонда таксонов с наиболее выраженной способностью к биосинтезу широкого спектра действующих веществ разной химической природы, играющих важную роль в метаболизме человека. Для решения данной задачи в 2008—2009 гг. было проведено сравнительное исследование содержания ряда органических кислот, терпеноидов и углеводов в плодах дикорастущей природной формы кизила настоящего и вышеперечисленных его сортов украинской селекции, выведенных в условиях более теплого, относительно Беларуси, климата с жарким летом и обилием солнечных дней.

Материалы и методы исследований. При проведении исследований в свежих усредненных пробах плодов кизила определяли содержание: сухих веществ — по ГОСТ 8756.2—82 [1]; аскорбиновой кислоты (витамина С) — стандартным индофенольным методом [2]; титруемых кислот (общей кислотности) — объемным методом [2]. В высушенных при температуре 65 °С усредненных пробах плодов определяли содержание бензойной кислоты — по СТ СЭВ 4879—84 [9], фенолкарбоновых кислот (в пересчете на хлорогеновую) — методом нисходящей хроматографии на бумаге [6]; жирных масел — по методу В. А. Сапунова и И. И. Федуняк [7]; тритерпеновых кислот (в пересчете на урсоловую) — по методу А. В. Симонян и др. [8]; содержание глюкозы, фруктозы, сахарозы — резорциновым и анилинфталатным методами бумажной хроматографии по И. Г. Завадской и др. [3]; пектиновых веществ (водорастворимого пектина и протопектина) — карбазольным методом [2]. Все аналитические определения выполнены в 3-кратной биологической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы Excel.

Результаты и их обсуждение. Поскольку проведение исследований осуществлялось на протяжении двух вегетационных сезонов, то обсуждение полученных результатов целесообразно предварить краткой характеристикой погодных условий периода формирования биохимического состава плодов *Cornus mas* L. в годы наблюдений, пришедшегося на июнь—сентябрь. По данным Белгидромета, данный период в 2008 г. характеризовался более теплыми, чем в 2009 г., июнем и особенно августом, но более прохладными июлем и особенно сентябрем, при соответствующих различиях среднемесячной температуры воздуха в пределах 0,5—2,3 °С. Однако наиболее выразительные межсезонные контрасты были свойственны режиму выпадения атмосферных осадков. Так, за интересующий нас период в целом в 2009 г. выпало почти вдвое большее их количество, нежели в 2008 г., при крайне неравномерном распределении по месяцам, причем количество осадков в июне и июле превышало таковое в 2008 г. соответственно в 4,6 и 1,9 раза, тогда как в августе оно уже уступало аналогичному показателю в первый год наблюдений в 1,6 раза,

Национальная академия наук Беларуси

при адекватном их количестве в сентябре. Полагая, что определяющую роль в накоплении полезных веществ в плодах кизила играют погодные условия на заключительном этапе созревания в августе, следует признать, что во второй год наблюдений они, из-за пониженного температурного фона и малого количества атмосферных осадков, оказались более жесткими, чем в первый.

Согласно нашим данным, в условиях сезона 2008 г. плоды исследуемых таксонов кизила настоящего характеризовались весьма высоким содержанием сухих веществ, составлявшим 19,4—23,2 %, а также свободных органических кислот, варьировавшимся в их сухой массе в диапазоне значений от 14,9 до 21,4 % при сравнительно невысоком содержании аскорбиновой кислоты, не превышавшем 288,4—393,5 мг%. Сопоставление приведенных показателей с аналогичными показателями, полученными для исследуемых сортов кизила украинскими коллегами [4], не выявило существенных межрегиональных различий в содержании в плодах сухих веществ, но вместе с тем показало, что в условиях более теплого, чем в районе интродукции, климата Украины в них накапливается в 1,2—2,6 раза больше, чем в условиях Беларуси, аскорбиновой кислоты, но в то же время в 1,7—2,6 раза меньше свободных органических кислот. При этом в первом случае наиболее выразительные межрегиональные контрасты установлены для сорта Владимирский, наименьшие — для сортов Лукьяновский и особенно Радость, во втором случае — соответственно для сорта Радость и сортов Лукьяновский и особенно Владимирский. Содержание фенолкарбоновых и бензойной кислот в сухой массе плодов исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. составляло соответственно 310,0—416,7 мг% и 1,37—1,89 %, терпеноидов — тритерпеновых кислот и жирных масел 1,25—1,84 % и 1,02—1,25 % соответственно.

При сопоставлении в условиях сезона 2008 г. параметров накопления сухих веществ и органических кислот в плодах сортового материала кизила настоящего и его природной дикорастущей формы, принятой за эталон сравнения, было установлено весьма значительное отставание от нее всех тестируемых таксонов в накоплении свободных органических, аскорбиновой и бензойной кислот, составившее соответственно 8,4—30,4; 6,6—26,7 и 14,3—27,5 % (табл. 1). Наиболее выраженным отставанием в первом случае характеризовались сорта Владимирский, Лукьяновский и Радость, во втором и третьем — сорта Владимирский и Лукьяновский. Наименьшими же контрастами с природной формой кизила в содержании перечисленных органических кислот характеризовались сорта Евгения и Выдубецкий. Что касается фенолкарбоновых кислот, то у трех сортов *Cornus mas.* L. — Владимирский, Выдубецкий и Радость не было выявлено сколь-либо значимых различий с природной формой в их накоплении, тогда как для сортов Евгения и особенно Лукьяновский было показано существенное (на 14,4 и 28,9 %) превышение эталонных значений данного признака. При этом лишь в единичном случае — для плодов сорта Владимирский было установлено незначительное (на 3,6 %) превышение эталонного уровня накопления сухих веществ, тогда как для остальных сортов отмечено их более низкое содержание, при наибольших контрастах (13,4 %) у сорта Лукьяновский. Вместе с тем для сорта Радость достоверных различий с природной формой кизила по данному признаку выявлено не было. Весь сортовой материал превосходил ее по содержанию в пло-

Национальная академия наук Беларуси

дах тритерпеновых кислот на 7,2—47,2 %, при наиболее выразительных контрастах у сорта Лукьяновский и наименьших — у сортов Владимирский и Выдубецкий. Превышение эталонного уровня накопления в плодах тестируемых сортов кизила растительных липидов на 3,6—11,6 % отмечено лишь у трех из них — Владимирского, Евгении и в наибольшей степени — у сорта Лукьяновский. Для сорта Радость достоверных различий с природной формой по данному признаку выявлено не было, а для сорта Выдубецкий было показано отставание от нее в содержании в плодах жирных масел на 8,9 %.

Таблица 1. **Степень различий с природной формой содержания органических кислот и терпеноидов в сухой массе плодов интродуцированных сортов *Cornus mas.* L., % в годы исследований**

Год	Сорт кизила настоящего	Сухие вещества	Органические кислоты				Терпеноиды	
			свободные	аскорбиновая	фенолкарбоновые	бензойная	тритерпеновые кислоты	жирные масла
2008	Владимирский	+3,6	—29,0	—26,7	—	—24,3	+7,2	+7,1
	Выдубецкий	—2,7	—15,4	—6,6	—	—19,6	+7,2	—8,9
	Евгения	—6,7	—8,4	—8,4	+14,4	—14,3	+9,6	+3,6
	Лукьяновский	—13,4	—30,4	—16,0	+28,9	—27,5	+47,2	+11,6
	Радость	—	—28,0	—8,6	—	—22,8	+13,6	—
2009	Владимирский	+17,4	—18,8	—21,5	+14,3	—6,9	+29,5	—5,6
	Выдубецкий	+28,8	—8,8	—	+19,8	—4,4	—	—18,7
	Евгения	+7,6	—	—	—	—	+5,4	—13,4
	Лукьяновский	+13,6	—	+33,1	+18,7	—12,0	—8,7	—23,1
	Радость	+4,9	—13,5	+22,8	+16,5	—10,1	—10,7	—13,4

Примечание. Прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий при $p < 0,05$.

В условиях сезона 2009 г. плоды исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. характеризовались сходным с установленным в предыдущем сезоне содержанием сухих веществ, варьировавшимся в диапазоне значений от 18,4 до 23,7 %, при несколько меньшем, чем годом ранее, содержании в их сухой массе свободных органических кислот, составлявшем 13,8—17,1 %, но при более высоком содержании в ней витамина С, изменявшемся в диапазоне значений от 316,8 до 537,2 мг%. Степень же проявления межсезонных различий в накоплении в плодах указанных веществ у разных таксонов оказалась неодинаковой. Так, несмотря на сходство диапазонов варьирования содержания в них сухих веществ, в большинстве случаев во втором сезоне оно было на 5—18 % ниже, чем в первом, и лишь у двух сортов — Выдубецкий и Лукьяновский на 8—9 % превышало прошлогодние значения. Если у природной формы кизила содержание в плодах титруемых кислот во втором сезоне уступало таковому в предыдущем сезоне на 21 %, то у сортового материала относительные размеры подобных различий не превышали 5—14 %, а у сорта Лукьяновский наблюдалось даже превышение прошлогоднего значения данного признака на 15 %. Погодные условия сезона 2009 г. не оказали сколь-либо выраженного влияния на накопление в плодах дикорастущей формы кизила аскорбиновой кислоты, но вместе с тем существенно активизировали ее накопление в плодах интродуцированных сортов. На это указывало увеличение в них содержания витамина С на 9—62 % относительно предыдущего сезона, в наибольшей степени проявившееся у сортов Радость и особенно Лукьяновский.

Национальная академия наук Беларуси

Содержание фенолкарбоновых кислот в сухой массе плодов интродуцированных таксонов *Cornus mas.* L. в условиях сезона 2009 г. варьировалось в сходном с предыдущим сезоном диапазоне значений от 303,3 до 363,3 мг %, при весьма неоднозначном влиянии погодных факторов на параметры их накопления у разных объектов. Так, если у дикорастущей формы кизила, как и у его сортов Евгения и Лукьяновский, во второй год наблюдений они оказались ниже, чем в первый, на 6—17 %, то у остальных исследуемых таксонов, напротив, выше на 7—12 %. Что касается бензойной кислоты, то в условиях сезона 2009 г. ее содержание в сухой массе плодов исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. оказалось сопоставимо с таковым в предыдущем сезоне и изменялось в таксономическом ряду в диапазоне значений от 1,40 до 1,59 %, при отсутствии сколь-либо значимых межсезонных различий в ее накоплении у сортового материала, но на 16 % более низких его параметрах во второй год наблюдений у дикорастущей формы кизила.

Диапазоны варьирования в таксономическом ряду *Cornus mas.* L. в условиях сезона 2009 г. содержания в плодах тритерпеновых кислот и особенно жирных масел заметно сместились в область более высоких, чем годом ранее, значений и составили для первых 1,33—1,93 %, вторых — 2,06—2,68 % сухой массы. Это свидетельствовало о стимулирующем биосинтез данных соединений действии пониженных температур воздуха в период созревания плодов. При этом относительная величина межсезонных различий параметров накопления в них жирных масел у исследуемых объектов составляла 65—139 %. Что касается тритерпеновых кислот, то подобные различия в их накоплении проявились менее контрастно (в пределах 6—44 %), причем более высоким содержанием в плодах данных соединений во второй год наблюдений, нежели в первый, была отмечена лишь часть исследуемых объектов — природная форма кизила, а также его сорта Владимирский, Выдубецкий и Евгения. Для сортов же Лукьяновский и Радость, напротив, во втором сезоне было показано на 26 и 6 % соответственно меньшее содержание в плодах тритерпеновых кислот.

Неадекватность ответной реакции исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. на изменение погодных условий в 2009 г. заметно повлияла на степень проявления различий в накоплении рассматриваемых соединений в плодах его природной формы и сортового материала. Так, если годом ранее большинство интродуцированных сортов уступали первой в содержании в них сухих веществ, то во втором сезоне все они, напротив, превосходили ее по данному признаку на 5—20 % (см. табл. 1). При этом менее выразительный характер, при сохранении отрицательной направленности, обрели аналогичные различия в содержании в плодах свободных органических кислот, причем у сортов Евгения и Лукьяновский отмечено полное их нивелирование. Единственным сортом, обнаружившим, как и в предыдущем сезоне, меньшее, чем у дикорастущей формы кизила, содержание в плодах витамина С, оказался сорт Владимирский. При этом у двух сортов — Выдубецкий и Евгения не было выявлено сколь-либо значимых расхождений с ней по данному признаку. Вместе с тем сорта Радость и Лукьяновский в условиях сезона 2009 г. существенно (на 23 и 33 % соответственно) превосходили природную форму *Cornus mas.* L. в содержании в плодах аскорбиновой кислоты. Различия же большинства ин-

Национальная академия наук Беларуси

тродуцированных сортов кизила с его дикорастущей формой в накоплении в плодах фенолкарбоновых кислот обозначились более контрастно, чем годом ранее, при выраженном сходстве относительных размеров превышения эталонных значений в пределах 14—20 %. Лишь у сорта Евгения содержание в них данных соединений оказалось таким же, как у природной формы исследуемого вида.

Как и в предыдущем сезоне, плоды интродуцированных сортов кизила настоящего уступали природной форме в содержании бензойной кислоты, но это отставание, из-за показанного выше меньшего ее накопления в плодах эталонного объекта, носило менее выраженный, чем годом ранее, характер и не превышало 4—12 %, при сохранении наибольших контрастов с ним по данному признаку у сорта Лукьяновский и их полном нивелировании у сорта Евгения. Вместе с тем различия гидротермического режима вегетационного периода в годы наблюдений заметно повлияли на направленность и степень различий сортового материала с природной формой кизила в содержании в плодах терпеноидов. Так, если в предыдущем сезоне параметры накопления в них тритерпеновых кислот, особенно у сорта Лукьяновский, заметно превосходили таковые у природной формы кизила, то в условиях сезона 2009 г. более высоким, чем у нее, содержанием в плодах данных соединений (на 30 и 5 %) характеризовались лишь два сорта — Владимирский и Евгения (см. табл. 1). При этом сорта Лукьяновский и Радость уступали дикорастущей форме в их накоплении на 9 и 11 %, на фоне отсутствия достоверных различий с ней по данному признаку у сорта Выдубецкий. Если годом ранее содержание растительных липидов в плодах тестируемых таксонов кизила в основном превосходило эталонный уровень, то во второй год наблюдений оно, напротив, уступало ему на 6—23 %, при наиболее выразительных контрастах с ним у сорта Лукьяновский.

По нашим оценкам, суммарное содержание растворимых сахаров в сухой массе плодов исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. в условиях сезона 2008 г. составляло 9,5—13,6 %. Доминирующее положение в пуле этих углеводов принадлежало моносахаридам, содержание которых в 9,5—12,8 раза превышало таковое дисахарида. При этом плоды природной формы кизила, как и сортов Выдубецкий и Радость, характеризовались примерно одинаковым долевым участием в его составе обеих моноз. В плодах же остальных интродуцированных сортов кизила содержание фруктозы в 1,2—1,6 раза превышало таковое глюкозы, при наиболее выраженном превышении у сортов Лукьяновский и Евгения. На превалирующее положение фруктозы в пуле растворимых сахаров плодов кизила есть указание и в работе С. В. Клименко [5]. Вместе с тем приводимые этим автором данные об общем количестве растворимых сахаров оказались в 1,6—3,5 раза выше установленных в наших исследованиях, что однозначно указывает на то, что климатические условия Беларуси отнюдь не способствовали активному биосинтезу этих соединений в плодах теплолюбивого кизила. Данное обстоятельство, вкупе с показанным выше более существенным, чем в условиях Украины, накоплением в плодах титруемых кислот, обусловило их весьма кислый вкус. На это указывают крайне низкие, в отдельных случаях на порядок уступавшие полученным в условиях Украины,

Национальная академия наук Беларуси

значения сахаро-кислотного индекса плодов, варьировавшиеся в ряду исследуемых таксонов в диапазоне от 0,45 до 0,91.

Сопоставление основных характеристик пула растворимых сахаров плодов интродуцированных сортов *Cornus mas.* L. и его природной формы (табл. 2) показало, что все они характеризовались на 11,9—42,3 % более высоким, чем у нее, общим накоплением данных соединений, при наиболее выраженных контрастах у сорта Лукьяновский. У остальных же сортов степень данных различий варьировалась в пределах 12—16 %. При этом весь сортовой материал превосходил природную форму кизила на 11,7—75,6 % в содержании в плодах фруктозы, при наибольших расхождениях с ней у сорта Лукьяновский, для которого так же, как и для сорта Выдубецкий, было показано более активное накопление в плодах и глюкозы, и сахарозы. В остальных случаях активизацией накопления в плодах одновременно с фруктозой характеризовалась либо глюкоза, либо сахароза, что вызывало соответствующие сдвиги в соотношениях фракций растворимых сахаров. Тем не менее, более высокое, чем у природной формы, общее содержание последних в плодах интродуцированных сортов кизила, в сочетании с показанным выше отставанием от нее в накоплении свободных органических кислот, обусловило более сладкий вкус плодов сортового материала, на что указывает превышение в них на 22,2—102,2 % эталонного значения сахаро-кислотного индекса, при наибольших различиях с ним у сорта Лукьяновский.

Таблица 2. **Степень различий с природной формой содержания углеводов в сухой массе плодов интродуцированных сортов *Cornus mas.* L., % в годы исследований**

Год	Сорт кизила настоящего	Растворимые сахара							Пектиновые вещества			
		Глюкоза	Фрук-тоза	Саха-роза	Сумма раствор. сахаров	Фрукт./ Глюк.	Монозы/ Дисахарид	Сахаро-кислотн. индекс	Гидро-пектин	Прото-пектин	Сумма пектинов	Пртп./ Гдрп.
2008	Владимирский	—	+31,1	—	+14,5	+20,0	+16,7	+60,0	—20,0	—36,6	—31,6	—18,2
	Выдубецкий	+9,9	+11,7	+24,4	+11,9	—	—	+31,1	—24,6	—14,0	—17,3	+18,2
	Евгения	—16,6	+42,8	+25,6	+13,7	+60,0	—	+22,2	—22,2	—29,8	—27,5	—9,1
	Лукьяновский	+9,4	+75,6	+46,3	+42,3	+50,0	—	+102,2	—4,9	—41,2	—30,0	—36,4
	Радость	+17,5	+18,7	—	+16,4	—	+18,5	+60,0	—17,8	—25,0	—22,8	—9,1
2009	Владимирский	+33,2	+15,0	+13,5	+20,9	—11,8	+7,3	+47,6	+47,5	—16,4	+5,8	—42,1
	Выдубецкий	+44,3	+12,1	—	+22,4	—23,5	+18,4	+33,3	+45,2	—16,1	+5,1	—42,1
	Евгения	+19,5	+6,7	+20,2	+12,2	—11,8	—	+11,1	+43,3	—22,0	—	—47,4
	Лукьяновский	+43,5	—	+42,7	+20,2	—29,4	—17,4	+19,1	—8,8	—10,7	—10,0	—
	Радость	+7,2	—5,4	+10,1	—	—11,8	—9,2	+14,3	—	—	—	—

Примечание. Прочерк означает отсутствие статистически значимых по *t*-критерию Стьюдента различий при $p < 0,05$.

Диапазон варьирования суммарного содержания растворимых сахаров в плодах интродуцированных таксонов *Cornus mas.* L. в условиях сезона 2009 г. охватывал область близких с таковыми в предыдущем сезоне значений от 10,6 до 13,0 % сухой массы, при сходных диапазонах изменения размеров соотноше-

Национальная академия наук Беларуси

ний их отдельных фракций. Вместе с тем у большинства исследуемых объектов общее содержание в плодах растворимых сахаров в пределах границ указанного диапазона на 10—22 % превышало прошлогодний уровень, и лишь у сортов Радость и Лукьяновский подобные различия не нашли статистического подтверждения. Данное превышение было обусловлено, главным образом, активизацией во втором сезоне у всех таксонов кизила, кроме сорта Лукьяновский, биосинтеза в плодах доминирующей фракции моноз — фруктозы на 7—44 %, при наиболее выразительных, причем проявившихся в равной степени, межсезонных контрастах у его природной формы и сорта Выдубецкий.

Параметры накопления глюкозы в плодах сортов Владимирский, Выдубецкий и Лукьяновский были отмечены отсутствием межсезонных различий, тогда как у природной формы и сорта Радость во втором сезоне они оказались на 20 и 26 % ниже, нежели в первом, а у сорта Евгения, напротив, на 15 % выше. Что касается сахарозы, то условия сезона 2009 г. способствовали активизации ее накопления относительно предыдущего сезона на 8—26 % лишь в плодах природной формы, а также в плодах сортов Владимирский и Радость, на фоне ингибирования ее накопления на 9 % в плодах сорта Выдубецкий и отсутствия в этом плане межсезонных контрастов у сортов Евгения и Лукьяновский.

Показанное выше ослабление биосинтеза титруемых кислот в плодах большинства исследуемых таксонов кизила в условиях сезона 2009 г., вкупе с достаточно выразительным обогащением их растворимыми сахарами, в свою очередь, обусловило заметные подвижки в данном сезоне в плане увеличения значений их сахаро-кислотного индекса на 27—42 %, особенно у природной формы и сорта Выдубецкий, что указывало на улучшение их органолептических свойств. При этом для сорта Радость было показано отсутствие межсезонных контрастов в значениях данного показателя, а для сорта Лукьяновский отмечено даже его снижение на 18 %.

Вместе с тем, как и годом ранее, в условиях сезона 2009 г. в плодах исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. весьма рельефно обозначились генотипические различия в содержании растворимых сахаров. Как следует из данных табл. 2, все тестируемые таксоны, за исключением сорта Радость, превосходили дикорастущую форму кизила в общем накоплении последних на 12—21 %. При этом плоды сортового материала в большей степени, чем в предыдущем сезоне, оказались богаче таковых природной формы кизила глюкозой (на 7—44 %), при наибольших контрастах с ней у сортов Выдубецкий и Лукьяновский. В то же время превышение эталонного уровня в содержании в плодах фруктозы оказалось менее выразительным, чем годом ранее, и составило не более 7—15 %, причем для сорта Лукьяновский, обладавшего в предыдущем сезоне наибольшим в таксономическом ряду размером данного превышения, достоверных различий в этом плане выявлено не было, а плоды сорта Радость даже незначительно (на 5 %) уступали природной форме в содержании данной монозы. Что касается сахарозы, то плоды всех тестируемых сортов *Cornus mas.* L., кроме сорта Выдубецкий, превосходили таковые природной формы в ее накоплении на 14—43 %, при наибольших контрастах, как и в предыдущем сезоне, у сорта Лукьяновский. При этом плоды сортового

Национальная академия наук Беларуси

материала, как и годом ранее, обладали на 11—48 % более высокими, чем у дикорастущей формы, значениями сахаро-кислотного индекса, при наибольших относительных размерах данного превышения у сортов Выдубецкий и особенно Владимирский.

Сравнительное исследование параметров накопления пектиновых веществ в сухой массе плодов исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. в условиях сезона 2008 г. показало, что их суммарное содержание в ней составляло 7,2—10,5 %, в том числе гидропектина — 2,4—3,2 %, протопектина — 4,3—7,3 %, при соотношении количеств нерастворимого и растворимого пектинов в пределах 1,4—2,6. Наиболее высокой способностью к накоплению в плодах данных соединений характеризовалась природная форма *Cornus mas.* L. Весь же сортовой материал уступал последней в общем накоплении пектинов на 17,3—31,6 %, при наиболее выраженных и примерно одинаковых контрастах с ней у сортов Лукьяновский и Владимирский (см. табл. 2).

Наименьшим отставанием от эталонных значений в этом плане характеризовался сорт Выдубецкий, для которого также было показано наименее выраженное в ряду сравниваемых таксонов *Cornus mas.* L. расхождение с природной формой в содержании в плодах протопектина при относительных различиях с ней по данному признаку в пределах 14,0—41,2 %. Поскольку в пектиновом комплексе плодов кизила фракция нерастворимого пектина является доминирующей, то вполне естественно, что наиболее выраженными различиями с природной формой в накоплении протопектина отличались сорта Владимирский и в большей степени Лукьяновский. Что же касается гидропектина, то плоды всех сортов *Cornus mas.* L. уступали таковым природной формы в его накоплении на 4,9—24,6 %, при наименьших контрастах у сорта Лукьяновский и наибольших — у сорта Выдубецкий. Неадекватная степень различий с эталонными значениями содержания в плодах сортового материала нерастворимого и растворимого пектинов обусловила существенные сдвиги в их соотношении относительно таковых в плодах природной формы. У большинства сортов *Cornus mas.* L. отмечены на 9,1—36,4 % более низкие, чем у последней, значения данного показателя, при наименьших расхождениях с ней у сортов Евгения и Радость, и лишь в единичном случае — у сорта Выдубецкий данный сдвиг на 18,2 % имел позитивную направленность, что свидетельствовало о более выразительном снижении относительно природной формы содержания в его плодах гидропектина, нежели протопектина, тогда как у остальных сортов наблюдалась противоположная картина.

Диапазон изменения суммарного содержания пектиновых веществ в плодах исследуемых таксонов *Cornus mas.* L. в условиях сезона 2009 г., составлявший 5,6—6,6 % сухой массы, охватывал область существенно меньших, чем годом ранее, значений, при более узком соотношении в них количеств прото- и гидропектина. Это было обусловлено, главным образом, выраженным ингибированием во втором сезоне биосинтеза доминирующей фракции данных соединений — нерастворимого пектина, содержание которого в плодах исследуемых объектов снизилось, по сравнению с предыдущим сезоном, на 15—45 %, при наибольшем проявлении данных различий у природной формы кизила и сорта Выдубецкий и наименьшем — у сорта Лукьяновский. В отличие

Национальная академия наук Беларуси

от протопектина, для гидропектина в половине случаев (сорта Владимирский, Выдубецкий и Евгения) во втором сезоне была отмечена активизация накопления в плодах на 23—29 %, тогда как у остальных таксонов наблюдалось снижение в них содержания не только протопектина, но и гидропектина на 18—36 %, относительно предыдущего сезона. Показанные межсезонные различия в накоплении в плодах исследуемых таксонов кизила отдельных фракций пектиновых веществ обусловили столь же выразительные различия (в пределах 8—40 %) и в их общем количестве, проявившиеся в наибольшей степени у природной дикорастущей формы кизила и в наименьшей — у сорта Владимирский.

Как следует из данных табл. 2, у большинства тестируемых сортов кизила настоящего, при сохранении установленной годом ранее отрицательной направленности различий с его природной формой в содержании в плодах протопектина, проявившихся, впрочем, в условиях сезона 2009 г. заметно слабее (в пределах 11—22 %), для параметров накопления в них гидропектина, напротив, было показано существенное превышение эталонного уровня на 43—48 % у сортов Владимирский, Выдубецкий и Евгения. Это, в свою очередь, обусловило у двух первых из них позитивный характер незначительных (не более 5—6 %) расхождений с природной формой кизила в общем содержании в плодах данных соединений. Взаимоисключающие же тенденции в направленности различий с ней содержания гидро- и протопектина в плодах сорта Евгения обусловили сходство у сравниваемых объектов параметров общего накопления данных веществ. Отсутствием достоверных различий с природной формой кизила в содержании в плодах обеих фракций пектинов во втором сезоне был отмечен сорт Радость, и лишь в единственном случае — у сорта Лукьяновский сохранилось установленное годом ранее, но слабее выраженное (в пределах 9—11 %), отставание от природной формы кизила в содержании в плодах обеих фракций пектиновых веществ.

Заключение. При обобщении представленных материалов были установлены отчетливые генотипические различия в содержании в плодах *Cornus mas.* L. исследуемых соединений, подтверждаемые следующими диапазонами изменения в таксономическом ряду усредненных в двулетнем цикле наблюдений параметров накопления в них сухих веществ: 20,2—22,8 %, а в их сухой массе — свободных органических кислот — 14,5—19,2 %, витамина С — 302,6—433,9 мг%, фенолкарбоновых кислот — 313,3—388,4 мг%, бензойной кислоты — 1,39—1,74 %, жирных масел — 1,60—1,90 %, тритерпеновых кислот — 1,37—1,64 %, растворимых сахаров: 10,1—13,2 %, в том числе глюкозы — 4,0—5,0 %, фруктозы — 5,2—6,9 %, сахарозы — 0,9—1,2 %, пектиновых веществ — 6,5—8,4 %, в том числе гидропектина — 2,4—2,9 %, протопектина — 4,0—5,7 %. При этом наиболее высоким содержанием в плодах сухих веществ характеризовались сорта Владимирский и Выдубецкий, свободных органических и бензойной кислот — сорт Евгения и особенно природная дикорастущая форма кизила, витамина С — сорта Лукьяновский и Радость, фенолкарбоновых кислот — сорт Лукьяновский, тритерпеновых кислот — сорта Владимирский и Лукьяновский, жирных масел — сорт Владимирский и дикорастущая форма кизила, растворимых сахаров — сорт Лукьяновский, пектиновых

Национальная академия наук Беларуси

веществ — сорт Владимирский, при наиболее сладком вкусе плодов у сортов Владимирский и Лукьяновский.

Показано, что погодные условия вегетационного периода в значительной мере определяли параметры накопления исследуемых соединений в плодах интродуцированных таксонов *Cornus mas.* L., чем оказывали существенное влияние на направленность и степень выразительности генотипических различий в их содержании. В оба сезона доминировало отставание сортового материала от природной формы кизила в накоплении в плодах свободных органических и бензойной кислот, при наиболее выразительных контрастах в первый год наблюдений, тогда как для содержания в них фенолкарбоновых кислот установлена противоположная этой картина, проявившаяся в наибольшей степени во втором сезоне. Доминирование же отрицательных тенденций в характере различий сортового материала с природной формой кизила в содержании в плодах сухих веществ и витамина С в первый год наблюдений сменило свой знак на противоположный во втором сезоне. При этом смена знака в ориентации различий сортового материала и дикорастущей формы кизила отмечена также для параметров накопления в плодах тритерпеновых кислот и жирных масел, но здесь, напротив, положительные различия, наблюдавшиеся в первом сезоне, уступили место отрицательным во втором сезоне. Плоды сортового материала превосходили таковые природной формы кизила в содержании всех фракций растворимых сахаров, при наиболее выразительных контрастах в накоплении фруктозы в первый год наблюдений, глюкозы — во второй. При этом они имели более сладкий, чем у дикорастущей формы, вкус, особенно в первом сезоне. Вместе с тем установлено отставание сортового материала кизила от его природной формы в содержании в плодах пектиновых веществ, в первую очередь, протопектина, наиболее выраженное опять же в первом сезоне.

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что все исследуемые сорта кизила украинской селекции, несмотря на выявленные межрегиональные различия (в районе интродукции и на родине) в содержании в плодах полезных веществ, достаточно успешно адаптировались к почвенно-климатическим условиям Беларуси, что подтверждается их обильным ежегодным плодоношением при высоком качестве ягодной продукции. Это позволяет рекомендовать их специализированным хозяйствам республики в качестве весьма перспективных объектов лечебного садоводства и исходной основы для создания отечественных сортов кизила. Вместе с тем, опираясь на полученные результаты, можно заключить, что среди таксонов *Cornus mas.* L., участвовавших в двулетнем биохимическом скрининге, наиболее предпочтительными в этом плане по уровню накопления в плодах исследуемых соединений являются сорта Владимирский и Лукьяновский.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Б08-057).

Литература

1. ГОСТ 8756.2—82: Методы определения сухих веществ. М., 1982. — 5 с.

2. Ермаков А. И., Арасимович В. В., Ярош Н. П. и др. Методы биохимического исследования растений. М., 1987. — 430 с.

Национальная академия наук Беларуси

3. З а в а д с к а я И. Г., Г о р б а ч е в а Г. И., М а м у ш и н а Н. С. // Методика количественной бумажной хроматографии сахаров, органических кислот и аминокислот у растений. М.; Л., 1962. С. 17—26.

4. К л и м е н к о С. В. Кизил. Сорта в Украине. Полтава, 2007. — 44 с.

5. М ж а в а н а д з е В. В., Т а р г а м а д з е И. Л., Д р а н и к Л. И. // Сообщ. АН Груз. ССР. 1971. Т. 63, вып. 1. С. 205—210.

6. С а п у н о в В. А., Ф е д у н я к И. И. Методы оценки кормов и зоотехнический анализ. Минск, 1958. С. 88—90.

7. С и м о н я н А. В., Ш и н к а р е н к о А. Л., О г а н е с я н Э. Т. // Химия природных соединений. 1972. № 3. С. 293—295.

8. СТ СЭВ 4879—84. Метод определения содержания бензойной кислоты. М., 1986. — 6 с.

J. A. RUPASOVA, I. M. GARANOVICH, T. M. SHPITALNAYA,
T. I. VASSILEVSKAYA, N. P. VARAVINA, N. B. KRINITSKAYA

PECULIARITIES OF ACCUMULATION OF ORGANIC ACIDS, TERPENOIDS AND CARBOHYDRATES IN FRUITS OF *CORNUS MAS.* L. OF UKRAINIAN SELECTION INTRODUCED IN CONDITIONS OF BELARUS

Summary

The paper describes results of a comparative study in a two-year cycle of observation of the content of dry matter, free organic, ascorbic, benzoic, phenolcarbolic and triterpene acids, fatty oils, soluble sugars and pectic substances in fruits of the natural wild form of *Cornus mas.* L. and its 5 sorts of Ukrainian selection (Vladimirsky, Vydubetsky, Eugenia, Lukianovsky, Radost) introduced in conditions of Belarus. There have been determined distinct genotypic differences in parameters of their accumulation, which have to a great extent depended on weather conditions during the plants vegetation period. Taxa of *Cornus mas.* L. with highest ability of fruits to biosynthesize the given compounds have been singled out. The leading position was taken by Vladimirsky and Lukianovsky sorts.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 621.039.75

А. А. БОРОВОЙ[1], Г. А. ШАРОВАРОВ[2]

ПРОБЛЕМЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

[1]РНЦ «Курчатовский институт»,
[2]Объединенный институт энергетических и ядерных исследований НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 15.11.2010)

На основе новых данных по топливному, радионуклидному и материальному балансу чернобыльской катастрофы показано, что главной проблемой объекта «Укрытие» сегодня продолжает оставаться его потенциальная опасность, значительно большая, чем это допускается нормами и правилами для объектов, содержащих ядерные и радиоактивные опасные материалы.

Введение. В результате чернобыльской катастрофы образовалось два опасных объекта: ядерноопасный разрушенный реактор и радиационно-опасные загрязненные территории. К сожалению, проблема преобразования этих объектов в экологически безопасные системы до сих пор не решена. Создание объекта «Укрытие» позволило локализовать подавляющую часть топливосодержащих масс (ТСМ), радиоактивных материалов и радиоактивных отходов, освободившихся от всех барьеров безопасности в результате аварии на ЧАЭС.

Согласно техническим документам, разработанным российскими и белорусскими специалистами, объект «Укрытие» должен был выполнять следующие требования:

предотвратить выход в окружающую среду радиоактивных продуктов из разрушенного реактора;

защитить прилегающую территорию и остававшиеся в эксплуатации блоки от проникающей радиации;

обеспечить контроль состояния топливосодержащих материалов и предотвратить образование критических масс ядерного топлива;

обеспечить отвод остаточного выделения энергии и исключить образование взрывоопасных газовых смесей.

Вместе с тем огромные трудности, связанные с его строительством, не позволили выполнить сформулированные требования в полном объеме, и, как отмечается в работе [1], главной особенностью объекта «Укрытие» продолжает оставаться его потенциальная опасность, по оценкам специалистов большая, чем это допускается нормами и правилами, существующими для объектов, содержащих ядерноопасные делящиеся и радиоактивные материалы.

Национальная академия наук Беларуси

За прошедшие годы проводились многочисленные оценки риска возникновения аварий в объекте «Укрытие», которые могли бы привести к облучению людей выше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды. После создания объекта «Укрытие» не отмечалось значительного роста коэффициентов размножения какого-либо из скоплений ТСМ за исключением инцидентов в 1990 г. в помещении 304/3 и в январе и сентябре 1996 г., когда было зарегистрировано значительное увеличение нейтронного потока.

Полученные авторами результаты стали основой для организации международных конкурсов и начала работ по преобразованию объекта в экологически безопасное состояние (план SIP) [2], участие в которых приняло все мировое сообщество. Предложен белорусско-российский проект «Зеленая лужайка».

Выполненный и предполагаемый ход этих работ по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасное состояние проиллюстрирован на рисунке.

В 2009 г. начато проектирование и подготовительные работы по строительству нового безопасного конфаймента. Он призван закрыть существующий объект «Укрытие» и полностью обезопасить окружающую среду от загрязнения, связанного с разрушенным блоком.

В статье на основе новых данных по топливному, радионуклидному и материальному балансу чернобыльской катастрофы, полученных авторами при выполнении проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Т08Р-034, приводятся результаты по проблемам чернобыльского объекта «Укрытие» в настоящее время и на дальнейших стадиях его преобразования.

Материалы и методы исследований. В качестве исходных данных принимаются результаты исследований по проблемам обеспечения ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие» [1—15] при работе в составе международной комплексной экспедиции РНЦ «Курчатовский институт» и межотраслевого научно-технического центра «Укрытие» в г. Чернобыль. Первым и общепризнанным документом, описывающим состояние ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие», было «Техническое обоснование ядерной безопасности», разработанное белорусскими и российскими учеными [3].

Выполнение работ по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасное состояние

Национальная академия наук Беларуси

В этой работе были суммированы экспериментальные и расчетные данные, имевшиеся к середине 1990 г., о топливосодержащих материалах объекта «Укрытие». Практически все время после аварии, по мере накопления информации о ТСМ, проводились работы по расчетным оценкам ядерной безопасности объекта «Укрытие». Первые из них выполнялись по упрощенным моделям, затем стали привлекаться все более сложные нейтронные программы для реакторных задач, разработанные российскими и белорусскими специалистами. Среди них **WIMS, КРАБ-1, РИТМ, КРАТЕР, MCNP, DECA и др. В** последние годы авторами были сделаны расчеты методом Монте-Карло. При этом макроскопические параметры получались на основании изучения сотен тысяч вариантов «нейтронных судеб» в скоплении.

Необходимо отметить, что даже после 24 лет исследований отсутствует полный объем необходимых данных об объекте «Укрытие», о находящихся в нем ТСМ, фрагментах активной зоны, мелкодисперсной топливной пыли, воды и других материалах.

Поэтому авторами был сделан анализ проблем безопасности на базе данных топливного, радионуклидного и материального баланса, полученных при выполнении проекта и экспертных оценок неизвестных параметров.

Для этой цели была создана комплексная методика, которая включала анализ переменных и переходных режимов реактора перед аварией, детальные расчеты состава активной зоны с учетом динамики аварийного процесса, реконструкцию радиоактивных выбросов и экспертную оценку опасности объекта «Укрытие».

Результаты и их обсуждение. Проведенный авторами анализ показал, что с момента завершения активной стадии аварии совокупность диагностических измерений указывала на подкритичность всех ТСМ, находящихся на объекте «Укрытие».

Количественные показатели коэффициента размножения для лавообразных ТСМ, полученные в экспериментах: менее 0,4 (на основе пассивных методов); менее 0,7 (на основе активных методов).

Необходимо, однако, отметить, что все исследования ТСМ проводились на поверхности скоплений, так как проникновению внутрь препятствовало отсутствие технологии извлечения высокоактивных кернов.

Расчетные исследования также подтвердили, что все обнаруженные к тому времени модификации ТСМ, в любых геометрических комбинациях, допускаемых размерами помещений объекта «Укрытие», при отсутствии воды глубоко подкритичны.

Оценки критичности смесей, состоящих из лавообразных ТСМ и воды, показали, что при исследованном составе лавы коэффициент размножения нейтронов (K_∞) всегда меньше 1.

Обоснование безопасности в этот период опиралось на то, что проникновению воды внутрь скоплений лавы препятствовали два барьера:

тепловой (большие скопления лавы должны были, по оценкам авторов, иметь внутри температуру значительно превышающую 100 °С, поскольку на поверхности измеренная температура составляла 60—70 °С);

наличие водонепроницаемой стеклообразной поверхности.

Национальная академия наук Беларуси

Дополнительным барьером безопасности служило то, что исследованные образцы воды в объекте «Укрытие» содержали нейтронные поглотители — соли бора и гадолиния, которые растворялись в воде при ее протекании через материалы, находящиеся в центральном зале (или вводились в объект при производстве работ).

На основании исследования динамики поведения ТСМ определены неблагоприятные тенденции, которые в будущем должны были привести к понижению подкритичности топливных скоплений.

За следующие годы после создания [3] в международной комплексной экспедиции РНЦ «Курчатовский институт» и межотраслевом научно-техническом центре «Укрытие» в Чернобыле под руководством авторов российские и белорусские ученые выполнили большой объем экспериментальных и расчетных исследований, в том числе и относящихся непосредственно к ядерной безопасности объекта «Укрытие».

Перечислим наиболее существенные результаты, которые привели к необходимости разработки новых данных по топливному, радионуклидному и материальному балансу чернобыльской катастрофы и пересмотра выводов [3].

Исследования образцов топливосодержащей лавы из подаппаратного помещения 305/2 показали присутствие в некоторых из них фрагментов активной зоны (АЗФ) в непереплавленном виде [4]. Кроме того, визуальные наблюдения зарегистрировали фрагменты зоны, находящиеся в непосредственном соприкосновении с лавой. Таким образом, при расчетах и оценках ядерной безопасности стало необходимо учитывать новую композицию «лава + АЗФ + вода», во многих случаях более опасную, чем композиция «лава + вода».

Авторами определено, что ряд барьеров безопасности на пути возникновения самопроизвольной цепной ядерной реакции (СЦР) заметным образом понизился.

Если ранее проникновению воды в лавообразные ТСМ препятствовали ее высокая температура и водонепроницаемость самого вещества, то сейчас ситуация изменилась. Наблюдения регистрировали значительное охлаждение лавы, ее растрескивание и превращение в водопроницаемую структуру.

С уменьшением остаточного энерговыделения β- и γ-источников все большее значение стала играть конденсационная вода, образующаяся на холодных поверхностях в помещениях объекта. Ее количество измеряется сотнями кубометров в год. Эта вода уже не проходит через большое количество материалов и не содержит поглотителей нейтронов.

Последние исследования авторов показали, что в условиях объекта «Укрытие» вода достаточно быстро очищается от нейтроннопоглощающих добавок. При прохождении слоя из осколков бетона, песка и других строительных конструкций она практически полностью теряет растворенные соли гадолиния и бора.

Авторами данной статьи показано, что совокупность наших знаний о ряде скоплений ТСМ недостаточна, чтобы доказать невозможность (или вероятность $<10^{-5}$ 1/лет) возникновения в них СЦР. Для помещений, о которых нет достаточной информации, при определенных исходных событиях нельзя ис-

Национальная академия наук Беларуси

ключать возможность уменьшения подкритичности ТСМ. К этим помещениям относятся центральный зал (ЦЗ), шахта реактора и подаппаратное помещение 305/2, в котором сосредоточена основная масса топливной «лавы».

Для ответа на вопросы о ядерной безопасности скоплений ТСМ необходимо проводить сложный многопараметрический анализ. Действительно, коэффициент размножения нейтронов для ТСМ зависит от количества и выгорания урана в скоплении, элементного состава (особенно важно количество нейтронных поглотителей и замедлителей, например, бора и воды), его полной массы, геометрических размеров, материалов, окружающих скопление (отражатели), температуры и т. п.

На основе проведенного анализа в таблице представлены основные композиции и параметры скоплений ТСМ и АЗФ, использовавшиеся в расчетных работах (кроме самых последних работ, которые рассматриваются ниже), а также ряд варьируемых в них характеристик, выполненных с участием авторов. Из данных таблицы видно, что к настоящему времени рассмотрены все практически осуществимые композиции. Результаты работ различных групп находятся в удовлетворительном согласии. И, тем не менее, несмотря на возрастающие возможности расчетных программ, однозначных ответов на заданный выше вопрос не получено. Основной причиной является недостаточные данные о макро- и микрохарактеристиках скоплений ТСМ в ряде помещений.

Поэтому авторами для получения новых современных исходных данных были выполнены работы по топливному, радионуклидному и материальному балансу чернобыльской катастрофы. Для этой цели были проведены комплексные исследования, которые включали анализ переменных и переходных режимов реактора, детальные расчеты состава активной зоны с учетом динамики аварийного процесса, реконструкцию радиоактивных выбросов и экспертную оценку возможности образования критических масс.

Получены новые данные по изменению суммарной активности непосредственно перед аварией и при аварийной нейтронной вспышке. Определено, что суммарная активность продуктов деления при работе на переменных и переходных режимах перед аварией снизилась, в основном за счет короткоживущих, с 14,6 до 5,1 млрд Ки. Исследование влияния реального режима работы реактора показало, что аварийная вспышка мощности практически не изменила активности радионуклидов с периодом полураспада $T_{1/2} > 1$ дня, но в значительной степени оказала влияние на активность изотопов с периодами полураспада < 10 ч. Суммарная активность активной зоны при аварийной вспышке увеличилась до 92,2 млрд Ки. Новые данные по радионуклидному и актиноидному составу при переменных и переходных режимах реактора стали основой для определения количества лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ), фрагментов активной зоны и мелкодисперсной радиоактивной пыли.

На основании проведенных исследований по топливному, радионуклидному и материальному балансу было определено, что в объекте «Укрытие» в настоящее время находится 152 т топлива, что составляет 80 % от массы топлива, находившейся в реакторе перед аварией. Из них 90 т входит в состав ЛТСМ и 62 т находятся в разрушенном реакторе в виде фрагментов и мелкоди-

Национальная академия наук Беларуси

Основные композиции и параметры скоплений ТСМ, использовавшиеся в расчетных работах

Работа. Организация	Год	Вид ТСМ			Распределение топлива		Выгорание МВт · сут/кг (U)		Вид замедлителя			Наличие поглотителя	
		ЛТСМ	АЗФ	ЛТСМ + АЗФ	гомо-генное	гетеро-генное	0	11,5	нет	вода	графит	нет	есть
Расчеты размножающих свойств гомогенных смесей. «КИ» [8]	1990	+			+			+		+		+	
Анализ ядерной безопасности объекта «Укрытие». ИЯЭ АН БССР [9]	1990	+	+		+	+	+	+		+	+	+	+
Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие». «КИ» [3]	1990	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
Экспертное заключение на материалы по оценке и прогнозу состояния ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие». ФЭИ [10]	1992		+		+		+			+		+	
Состояние ядерной, радиационной, экологической безопасности объекта «Укрытие». «КИ» [11]	1995	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. МНТЦ «Укрытие» [1]	1996	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Сценарий залива водой помещения 305/2. МНТЦ «Укрытие» [12]	1997	+				+				+		+	
Проведение расчетов и корректировка расчетных критпараметров для различных типов ТСМ, находящихся в помещениях «Укрытия» [13]	1993			+	+		+	+		+		+	+
Отчет GRS по проекту SR–2075/8–1, рабочий пункт 1 «Анализ и оценка «Технического обоснования ядерной безопасности объекта «Укрытие». Поведение критичности ТСМ на объекте «Укрытие». GRS [14]	1997	+		+	+	+	+	+		+		+	+
Некоторые вопросы ядерной безопасности объекта «Укрытие». МНТЦ «Укрытие», ИЯИ, ИТФ НАН Украины [15]	1999	+		+	+	+	+	+		+		+	

Национальная академия наук Беларуси

сперсной пыли. Накопление цезия-137 в реакторе перед аварией равно 7 МКи. Реконструированная величина выброса цезия-137 составляет (2,5 ± 08) МКи. Накопление йода-131 в реакторе перед аварией равно 86 МКи. Реконструированная величина выброса йода-131 составляет 49 МКи. На основании полученных результатов было определено влияние аварийной вспышки и аварийного выброса на остаточное тепловыделение. Полное энерговыделение в ТСМ и фрагментах активной зоны разрушенного реактора за счет β- и γ-излучения определялось как

$$Q_{\beta,\gamma}(\tau) = \Sigma A_l(\tau)E_l^{\gamma} + \Sigma A_l(\tau)E_l^{\beta},$$

где $A_l(\tau) = N_l(\tau)\lambda_l$ — активность l-го нуклида во времени; E_l^{β} — средняя энергия β-излучения l-го нуклида; E_l^{γ} — средняя энергия гамма-излучения l-го нуклида.

Мощность остаточного тепловыделения с учетом вылетевших изотопов даже через 6 ч после вспышки составляла 17 100 Квт и оказала значительное влияние на масштабы катастрофы. В настоящее время суммарная активность ЛТСМ, АЗФ и мелкодисперсной активной пыли равна 9,45 МКи активности. Общая площадь различного вида щелей и отверстий объекта «Укрытие» превышает 1000 м^2. За прошедшие годы под саркофагом скопилось большое количество мелкодисперсной радиоактивной пыли с суммарной активностью 1,5 млн Ки. Загрязнение окружающей среды радиоактивными материалами может произойти за счет выброса топливной пыли и миграции радионуклидов в почву с водой, которая находится в объекте. Сегодня чернобыльский объект «Укрытие» является более опасным, чем работающая АЭС.

Заключение. На основе новых данных по топливному, радионуклидному и материальному балансу чернобыльской катастрофы определено, что главной проблемой объекта «Укрытие» продолжает оставаться его потенциальная опасность, значительно большая, чем это допускается нормами и правилами, существующими для объектов, содержащих ядерноопасные делящиеся и радиоактивные материалы. Именно это послужило причиной начала работ по преобразованию объекта в экологически безопасное состояние (план SIP), участие в которых принимает все мировое сообщество. Наиболее безопасным является белорусско-российский сценарий «Зеленая лужайка» со строительством конфаймента, разборкой разрушенного реактора и захоронением отработанного топлива и радиоактивных отходов в установленном порядке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т08Р-034).

Литература

1. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: Отчет МНТЦ «Укрытие». Арх. № 3601. / Отв. исполнитель А. Боровой. Чернобыль, 1996. — 272 с.

2. EC-Tasis Nuclear Safety Program and the US-DOE-INSP-Program: «Chernobyl Unit 4 — Shelter Implementation Plan», 1997. — 232 p.

3. Беляев С. Т., Боровой А. А., Волков В. Г. и др. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие»: Отчет о НИР КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова. Чернобыль, 1990. — 160 с.

4. Богатов С. А., Евстратенко А. С., Сурин А. И. Справка о подкритичности ТСМ в пом. 305/2 4-го энергоблока ЧАЭС: Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» № 09-05/80 от 17.04.93 г. Чернобыль, 1993.

Национальная академия наук Беларуси

5. The Shelter current safety analysis and situation development forecasts (update version) / A. Borovoy et al. Tasis, European Commission, 1998. — 103 p.

6. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: Отчет МНТЦ «Укрытие». Арх. № 3836, 2001 г. / Отв. исполнитель А. А. Боровой. Чернобыль, 2001. — 337 с.

7. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие»: Отчет SIP-P-PM-22-460-SAR-124-01, 02 28.11.06. — 430 с.

8. Бродкин Э. Б., Хрусталев А. В. Расчеты размножающих свойств гомогенных смесей: Отчет ИАЭ им. И. В. Курчатова. Инв. № 30/1-1030-90. М., 1990. — 19 с.

9. Анализ ядерной безопасности объекта «Укрытие»: Отчет ИЯЭ АН БССР. Инв. № 1449. Минск, 1990. — 80 с.

10. Экспертное заключение на материалы по оценке и прогнозу состояния ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие»: Отчет № 60/12 от 01.07.92 / ФЭИ.

11. Богатов С. А., Боровой А. А., Гаврилов С. А. и др. Состояние ядерной, радиационной и экологической безопасности объекта «Укрытие» (Сбор, верификация, представление информации, проведение дополнительных исследований): Отчет ИВТЭМ РНЦ «Курчатовский институт». М., 1995. — 120 с.

12. Сценарий залива водой помещения 305/2 МНТЦ «Укрытие»: Отчет. 1997.

13. Бродкин Э. Б. Проведение расчетов и корректировка расчетных критпараметров для различных типов ТСМ, находящихся в помещениях «Укрытия»: Отчет по 3 этапу х/д 115, пункт 2.1.7. технического задания ИНИН УО ВЛ. 1993. — 8 с.

14. Гмаль Б., Мозер Е. Ф., Претш Г., Квадеу. Анализ и оценка «Технического обоснования ядерной безопасности объекта «Укрытие». Поведение критичности ТСМ на объекте «Укрытие»: Отчет GRS по проекту SR—2075/8—1, рабочий пункт 1, GRS —A — 2414, 1997. — 44 с.

15. Верцимаха О. Я., Павлович В. А., Бабенко В. А. и др. Некоторые вопросы ядерной безопасности объекта «Укрытие» // Ядерная и радиационная безопасность. 1998. Т. 1, вып. 2. С. 52—67.

A. A. BOROVOY, H. A. SHARAVARAU

PROBLEMS OF THE CHERNOBYL OBJECT SHELTER

Summary

The work is devoted to the chernobyl object Shelter problems. Nuclear, radionuclide and material balance was carried. It is shown, that the main problem of chernobyl object Shelter is more large potential dangerous, than permissible standard for objects, contained nuclear and radioactive dangerous materials today.

Национальная академия наук Беларуси

УДК 630*906

О. В. ЛАПИЦКАЯ

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПЕЛОСТИ БЕРЕЗОВЫХ И ОСИНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

(Поступила в редакцию 01.11.2010)

Рассчитаны возрасты экологической спелости березовых и осиновых насаждений. Для березовых нормальных и модальных древостоев они составляют от 70 до 80 лет в зависимости от класса бонитета, для осиновых — от 70 до 80 лет в нормальных и от 60 до 70 лет в модальных древостоях.

Введение. Лесная политика Республики Беларусь базируется на соблюдении принципов устойчивого развития в соответствии с приоритетами, обозначенными в «Повестке дня на XXI век», принятой Конференцией ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 г. Ключевым моментом в организации устойчивого развития лесного хозяйства является экологизация лесопользования.

В системе лесопользования важнейший элемент — возраст и оборот рубки. Рубку леса необходимо осуществлять в таком возрасте, чтобы не уменьшалась общая сумма экологических полезностей. Это возможно только при достижении лесами спелостей экологической природы: водоохранной, почвозащитной и т. д. В отдельных категориях лесов I группы такие спелости соблюдаются. Но экологические функции выполняют все леса, независимо от групп и категорий. В то же время возрасты рубки в разных группах и категориях лесов не всегда имеют должное экологическое обоснование. Поэтому при установлении возрастов рубки во всех лесах должен учитываться экологический императив [1; 2].

Для обеспечения экономического и экологического обоснования назначения древостоев в рубку нами ранее был разработан новый вид спелости леса — эколого-экономическая [3—5]. Но эта спелость не может быть реализована при наличии многочисленных видов спелостей экологической природы. Нужен интегральный экологический показатель, объединяющий все виды экологических полезностей. Этим показателем является предложенная нами ранее экологическая спелость леса, которая представляет собой состояние насаждений, обусловленное их возрастом, в котором достигается максимальная экологическая эффективность постоянного лесопользования [3—5].

Путем анализа количественных показателей разных экологических функций леса [6; 7] такой интегральный показатель был установлен [3; 4; 8], и эко-

Национальная академия наук Беларуси

логическая спелость найдена для древостоев сосны, ели и дуба [4; 9]. Для мягколиственных древостоев эта спелость не определялась.

Из изложенного следует, что установление величины экологической спелости для модальных и нормальных мягколиственных древостоев разного уровня производительности имеет важное научное и практическое значение.

Материалы и методы исследований. Материалом для выполнения настоящей работы послужили открытые ведомственные материалы и литературные источники [10—12].

Моделирование связей между количественными показателями различных экологических функций березовых и осиновых древостоев проведено, используя сведения о количественных величинах экологических функций леса [1; 6; 7; 13; 14], применяя стандартные процедуры корреляционного и регрессионного анализа [9].

Модели для расчета экологической спелости строились на основе системного подхода [15], т. е. учитывали совокупность всех значимо влияющих факторов. При этом выделение главного фактора среди экологических полезностей проводилось путем сопоставления значимости различных экологических полезностей на районном, региональном, республиканском и глобальном уровнях. Предпочтение отдавали тем полезностям, которые имеют глобальный уровень.

Возрасты экологической спелости определяли как экстремумы функции, описывающей изменение глобальных экологических полезностей в зависимости от возраста березовых и осиновых древостоев. При этом названные березовые и осиновые древостои были дифференцированы по условиям местопроизрастания (типам леса), которые характеризовались конкретными классами бонитета. Из директивно утвержденных справочных источников [12] получены данные о запасах древесины и приростах в названных древостоях.

Результаты и их обсуждение. Исследованиями разных авторов [1; 7; 13; 14; 16; 17], в том числе и нашими [3—5; 8], показано, что в системе экологических полезностей важнейшим фактором является депонирование CO_2. При этом величина депонированного углерода находится в прямой связи с накоплением биомассы. Поскольку в лесных экосистемах наибольшая биомасса накапливается в стволовой древесине, то ежегодный прирост этой древесины определяет основное ежегодное депонирование CO_2.

Известно, что спелость леса определяется величиной максимального среднего прироста того продукта или той полезности, которая положена в основу определения данной спелости [10; 18]. В нашем случае необходимо установить максимальный прирост накопления CO_2, который будет соответствовать максимальному среднему приросту.

Казалось бы, что эта задача достаточно проста и сводится к установлению максимума среднего прироста березовых и осиновых древостоев, т. е. к их количественной спелости [18]. Последняя в Беларуси определена разными авторами [10; 11; 18]. Если бы вопрос стоял об экологической спелости отдельного насаждения, то так и следовало бы поступить. Но экологические полезности леса формируются всеми лесными массивами лесхоза любой области и государства. Поэтому необходимо вывести модель связи $Z = f(A)$ для оценки мак-

Национальная академия наук Беларуси

симума экологических полезностей каждой хозсекции в пределах исследуемого объекта. Известно, что текущий и средний прирост зависят от многих факторов [6; 11; 19; 20]. Общая модель изменения прироста обычно представляется в виде $Z = f$(П, Б, А, Р), где Z — текущий или средний прирост; П — древесная порода; Б — уровень производительности — класс бонитета; А — возраст; Р — относительная полнота.

При константных значениях породы и уровней производительности прирост в наибольшей степени зависит от возраста и полноты. Возрастной тренд изменения прироста, как показали многочисленные исследования [9; 19—21], включает в себя следующие стадии.

Появление величины прироста в древостоях происходит в начале роста дерева и древостоя, т. е. на координатной сетке он соответствует точке 0, или началу осей координат.

На начальном периоде жизни древостоя его рост относительно медленный.

После прохождения некоторой стадии роста (у разных пород этот период наступает в разные годы) наблюдается резкое ускорение роста древостоя и его прироста. Этот момент является первой точкой перегиба, описывающего зависимость прироста от возраста при фиксированных значениях П, Б, Р.

Пройдя точку кульминации, прирост резко замедляется и к возрасту естественной спелости прекращается. Момент кульминации является второй точкой перегиба в исследуемой модели.

Функция, которая должна описывать изменение среднего прироста с возрастом и соответствовать указанным требованиям, может отображаться различными уравнениями. При их выборе целесообразно отдавать предпочтение наиболее простому, которое при этом будет удовлетворять вышеприведенным условиям и покажет хорошую аппроксимацию экспериментальных данных. В данном случае оказалось возможным использовать уравнение параболы третьего порядка.

Для оценки текущего и среднего прироста нормальных березовых и осиновых древостоев воспользовались официально утвержденными таблицами хода роста для Республики Беларусь [12]. Данные этих таблиц явились исходным материалом для построения упомянутой модели вида $y = a + bx + cx^2 + dx^3$, где x представляет собой масштабированный возраст A, т. е. $A/10$. Используя стандартные процедуры регрессионного анализа [9; 21] и специальные рабочие программы для ПЭВМ, вычислили коэффициенты соответствующих уравнений, описывающих зависимость среднего прироста от возраста для каждого класса бонитета (табл. 1). Экстремумы определены стандартным путем [9; 21; 22]. В результате определены возрасты количественной спелости исследуемых древостоев (табл. 2).

Величины, показанные в табл. 2, близки к данным других авторов [10; 11; 20], хотя наши показатели несколько больше.

Нами показано, что интегральная экологическая спелость должна определяться по максимальной величине депонирования диоксида углерода, так как именно этот показатель тесно связан со всеми остальными экологическими функциями леса. Это приводит к вычислению максимального среднего прироста в силу практически функциональной связи между накоплением CO_2

Национальная академия наук Беларуси

Таблица 1. **Коэффициенты уравнения вида $y = a + bx + cx^2 + dx^3$, выражающие зависимость среднего прироста от возраста для березовых и осиновых древостоев**

Порода	Класс бонитета	Коэффициенты уравнений			
		a	*b*	*c*	*d*
Береза	I[а]	5,443	2,199	−0,3574	0,01597
Береза	I	4,783	1,964	−0,3214	0,01434
Береза	II	3,466	1,910	−0,2981	0,01274
Береза	III	3,227	1,293	−0,2217	0,00995
Береза	IV	1,307	1,1238	−0,1635	0,0066
Осина	I[б]	4,852	4,956	−0,8617	0,04394
Осина	I[а]	1,986	5,2362	−0,85978	0,04209
Осина	I	0,254	4,9250	−0,78514	0,03746
Осина	II	−0,856	4,4043	−0,68727	0,03224

Таблица 2. **Возраст количественной спелости нормальных для березовых и осиновых древостоев**

Порода	Возраст максимума среднего прироста (количественная спелость) по классам бонитета, лет					
	I[б]	I[а]	I	II	III	IV
Береза	–	53	53	57	58	64
Осина	44	48	50	52	–	–

и приростом древесины. При этом необходимо рассматривать совокупность древостоев некоторого исследуемого региона.

Рассматривая лесные насаждения в дискретном состоянии, т. е. разрывая связь «пространство—время», приходим к оценке лишь отдельного древостоя и к его количественной спелости. Для удовлетворения лесосырьевых и лесоэкологических потребностей общества используется вся территория лесного фонда в его пространственно-временной взаимосвязи. Поэтому отыскание максимальной величины среднего прироста необходимо выполнить не для отдельного древостоя, а для их преемственно-возрастной совокупности на площади не менее лесхоза.

Изменение возраста спелости и рубки приводит к перераспределению площадей древостоев по группам и классам возраста и имеет следствием различные площади ежегодно вырубаемых древостоев, что сказывается на величине совокупного среднего прироста. Это позволяет, взяв некоторые реальные или условные величины первичной территориальной единицы для организации непрерывного и постоянного лесопользования, выполнить имитационное моделирование изменения запасов и средних приростов древостоя в зависимости от принятого возраста спелости. Критерием оптимальности явится суммарная максимальная величина среднего прироста.

Исходя из изложенных положений, разработан алгоритм определения экологической спелости лесных насаждений. Он реализован в виде блок-схемы, что позволило достаточно просто составить рабочую программу для ПЭВМ с целью вычисления искомых показателей. Поскольку блок-схема этого алгоритма обширна, то здесь отразим лишь основные принципы его построения в виде описания последовательного выполнения следующих операций.

1. Разделение возрастной структуры лесов на территории исследуемого объекта (лесхоза, области, республики) по группам возраста в зависимости от принятого в целях имитации возраста спелости.

Национальная академия наук Беларуси

2. Нахождение функции, описывающей изменение среднего прироста для заданного класса бонитета в зависимости от возраста древостоя, т. е. $Z_M^{\text{ср}} = f(\text{А, Б})$.

3. Определение величины максимального среднего прироста. Для этого полученные уравнения исследуем на их экстремумы, используя стандартные процедуры математического анализа [21; 22].

В соответствии с разработанным алгоритмом определения экологической спелости разработана рабочая программа для ПЭВМ. Программа составлена на алгоритмическом языке Delphi. Исходными данными, представленными в виде специальных справочников, явились следующие величины.

Распределение площадей и запасов модельного (условного) лесхоза площадью 120 тыс. га по классам возраста в зависимости от принятого возраста спелости березовых и осиновых древостоев.

Для осуществления имитационного моделирования с целью оптимизации возраста спелости приняты следующие варианты возрастов спелости (рубки), которые явились основанием для разделения древостоев на группы возраста: для березы — 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 лет; для осины — 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 лет. В каждом случае автоматически меняется распределение по группам возраста, например, при возрасте рубки в 51 год распределение следующее: молодняки — 1—20 лет (I класс возраста 1—10); средневозрастные — 21—40 лет; приспевающие — 41—50 лет; спелые — 51 год и старше. При возрасте рубки 80 лет распределение следующее: молодняки — 1—20 лет; средневозрастные — 21—70 лет; приспевающие — 71—80 лет; спелые — 81 год и старше. Соответственно площадь каждой группы возраста ($S_{\text{гр.в}}$) определяется по формуле $S_{\text{гр.в.}} = \dfrac{S \cdot n}{k}$,

где S — общая площадь насаждений i породы модельного лесхоза (в нашем примере 120 тыс. га); k — площадь, занятая каждым классом возраста; n — число классов возраста в i группе возраста.

$$k = \frac{S}{N}, \tag{1}$$

где N — количество классов возраста до момента рубки.

Например, при возрасте рубки в 51 год и общей площади i породы в 120 тыс. га площадь, занятая молодняками, составит $S_{\text{мол}} = \dfrac{120 \cdot 2}{6} = 40$ тыс. га.

Здесь 6 — число классов возраста до главной рубки, т. е. 1—10, 11—20, 21—30, 31—40, 41—50, 51—60, а 2 — количество классов возраста в группе молодняков (1—10 и 11—20).

Вычисление экстремумов среднего прироста проводилось после выведения модели прироста в явном виде в системе «MATHCAD» с ее увязкой в общем тексте программы.

Таблицы хода роста в [12] составлены для нормальных древостоев [10; 20; 23]. В то же время большую долю в лесном фонде занимают древостои меньшей полноты [10; 12]. Поэтому, наряду с расчетами для нормальных насаждений, проведены вычисления для модальных насаждений.

Национальная академия наук Беларуси

В случае с модальными насаждениями осложняющим моментом является то, что в таблицах хода роста для этой категории древостоев приводятся только средние изменения запасов, а не полный прирост. Использование данных о среднем изменении запасов вместо полного прироста приводит к заниженным возрастам любых спелостей [10; 19]. Поэтому при выполнении настоящей работы определен прирост модальных насаждений, пользуясь данными о приросте нормальных древостоев с коррекцией на полноту по формулам, приводимым в литературе [19; 20]. Сделав расчет по названным моделям, получили данные о величине среднего прироста модальных древостоев, учитывая, что модальная полнота исследуемых насаждений в интересующих нас возрастах равна для II—V классов возраста — около 0,7; для VI—X — 0,6 (табл. 3).

Проведя имитационное моделирование при разных возрастах спелости для нормальных и модальных древостоев, по величине максимального суммарного среднего прироста для принятой совокупности древостоев условного лесхоза (120 тыс. га), который является первичной учетной единицей для организации постоянного лесопользования [1; 9; 10], определили возраст экологической спелости. Расчеты здесь весьма обширны. Поэтому в статье для сокращения приведены лишь данные для березовых древостоев I класса бо-

Таблица 3. **Динамика среднего прироста в модальных древостоях**

Класс возраста древостоя	Средний возраст древостоя	Величина среднего прироста, м³/га, для насаждений										
		березовых						осиновых				
		полнота	классы бонитета					полнота	классы бонитета			
			Iа	I	II	III	IV		Iб	Iа	I	II
I	5	0,7	2,7	1,8	1,3	0,8	0,5	0,80	4,0	3,1	2,2	1,1
II	15	0,7	6,8	5,4	4,8	3,9	2,2	0,80	9,9	7,6	5,6	3,9
III	25	0,7	7,6	6,7	5,5	4,4	2,7	0,70	10,9	9,0	7,1	5,4
IV	35	0,7	8,0	7,0	5,8	4,5	2,9	0,70	11,4	9,8	8,0	6,4
V	45	0,7	8,0	7,1	6,0	4,6	3,0	0,60	10,7	9,4	7,8	6,0
VI	55	0,6	7,2	6,3	5,5	4,0	2,8	0,55	9,5	8,5	7,0	5,5
VII	65	0,6	6,9	6,1	5,2	3,8	2,7	0,50	8,8	8,1	6,5	2
VIII	75	0,6	6,6	5,8	4,9	3,5	2,5	0,45	8,4	7,4	6,0	4,8
IX	85	0,6	6,3	5,5	4,6	3,3	2,4	0,40	7,5	7,0	5,6	4,0
X	95	0,6	6,0	5,2	4,3	3,1	2,2	–	–	–	–	–

Таблица 4. **Суммарный средний прирост для совокупности березовых нормальных древостоев I класса бонитета при разном возрасте спелости**

Класс возраста	Средний прирост класса возраста (тыс.м³) при возрасте спелости							
	25	32	45	55	65	75	85	95
1	88	66	53	44	38	33	29	26
2	256	192	154	128	110	96	86	77
3	320	240	192	160	138	120	107	96
4	–	249	199	166	142	125	110	100
5	–	–	202	168	144	126	112	101
6	–	–	–	164	140	123	109	99
7	–	–	–	–	135	119	105	95
8	–	–	–	–	–	113	100	90
9	–	–	–	–	–	–	94	85
10	–	–	–	–	–	–	–	82
Итого	664	747	800	830	847	855	852	851

Национальная академия наук Беларуси

нитета (табл. 4). В приведенном примере площадь, занятая каждым классом возраста, определена по формуле (1) и колеблется от 40 тыс. га для возраста спелости в 25 лет (3 класса возраста) до 12 га при спелости в 95 лет (10 классов возраста).

Величины среднего прироста в каждом классе возраста при разных возрастах спелости получили путем умножения соответствующих значений прироста на одном га, взятых для нормальных древостоев из [12], а для модальных из табл. 3 — на площадь, занятую древостоями каждого класса возраста. Последняя, как показано выше, изменяется в зависимости от возраста спелости.

Суммировав данные о величине среднего прироста по классам возраста, получили итоговое значение среднего прироста на всей исследуемой территории при разных возрастах спелости. Проведя аппроксимацию этих итоговых значений (в нашем примере графа «Итого» табл. 4) по уравнениям полиномов третьей степени и найдя их экстремумы, вычислили возраст экологической спелости для нормальных и модальных древостоев в разрезе классов бонитета (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. **Экологическая спелость березовых и осиновых насаждений**

Категория древостоя	Возраст экологической спелости по классам бонитета, лет					
	I[б]	I[а]	I	II	III	IV
Березовые насаждения						
Нормальные	—	71	73	75	76	80
Модальные	—	68	70	73	75	76
Осиновые насаждения						
Нормальные	71	73	75	80	—	—
Модальные	60	62	65	70	—	—

Данные табл. 5 показывают, что возраст экологической спелости березовых древостоев соответствует современному возрасту рубки в лесах I группы. Разница в возрастах экологической спелости для нормальных и модальных древостоев березы незначительная. Из этого следует, что возрасты рубки в данных насаждениях можно устанавливать без учета полноты.

В осиновых насаждениях возраст экологической спелости на 2—2,5 класса возраста выше, чем возраст их рубки. Это вызвано тем, что возраст рубки осинников установлен с учетом их товарности с целью недопущения снижения качества деловой древесины от поражений ядровой гнилью.

Модальные древостои осины имеют экологическую спелость примерно на класс возраста ниже, чем нормальные древостои.

Сопоставление данных из табл. 2 и 5 показывает, что возраст количественной спелости отдельного древостоя значительно (на 30—50 %) ниже, чем экологическая спелость для хозсекции.

Заключение. На основании изложенного приходим к следующим выводам.

Установлена высокая корреляционная связь между количественными показателями экологических функций леса. Это позволяет заменить многочисленные функции леса при установлении экологической спелости главным экологическим фактором — величиной депонирования CO_2 [3—6; 8].

Национальная академия наук Беларуси

Математическая модель связи среднего прироста с возрастом имеет две точки перегиба: в начале периода «большого роста» и по его завершении. Поэтому уравнение зависимости среднего прироста от возраста должно учитывать эту особенность. Для аппроксимации нами использованы полиномы третьей степени как наиболее простую модель, удовлетворяющую названным требованиям. Но могут быть применены и другие кривые, обеспечивающие наличие двух точек перегиба. Нахождение экстремумов этих уравнений (при элиминировании древесной породы, уровня производительности и полноты), описывающих связь среднего прироста с возрастом, позволяет определить возраст экологической спелости.

Алгоритм нахождения экологической спелости базируется на нахождении максимальной величины среднего прироста не для одного древостоя (это приводит только к количественной спелости), а для их совокупности для заданных объектов исследования. Сочетание различных групп возраста древостоя дает отличия вычисленного возраста экологической спелости от данных количественной спелости одного древостоя. Наиболее удобным методом нахождения такого оптимума является имитационное моделирование.

Экологическая спелость нормальных и модальных березовых древостоев соответствует VIII классу возраста и равна возрасту рубки этих насаждений в лесах первой группы.

Экологическая спелость нормальных осиновых насаждений наступает в восьмом классе возраста, а для модальных древостоев в VII классе возраста.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Б07М-88).

Литература

1. Ч у е н к о в В. С. // Многоцелевое лесопользование: сб. науч. тр. М., 1992. С. 3—10.

2. Ш и м о в а О. С. // Европа — наш общий дом. Экологические аспекты: тематич. докл. науч. конф., Минск, 2000 г. Минск, 2000. Ч. 1. С. 207—215.

3. Л а п и ц к а я О. В. // Сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. Гомель, 2003. Вып. 57: Лес в жизни восточных славян от Киевской Руси до наших дней. С. 74—77.

4. Л а п и ц к а я О. В. // Сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. Гомель, 2005. Вып. 64: Проблемы лесоведения и лесоводства. С. 352—363.

5. Н е в е р о в А. В., Л а п и ц к а я О. В. // Сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. Гомель, 2001. Вып. 53: Проблемы лесоведения и лесоводства. С. 383—387.

6. К у н ц е в а л о в М. А. // Изв. вузов. Лесной журнал. 2000. № 2. С. 36—40.

7. Н е в е р о в А. В. Экономика природопользования: учеб. пособие для вузов. Минск, 2009. — 554 с.

8. Н е в е р о в А. В., Л а п и ц к а я О. В. // Ресурсосберегающие технологии в лесном хозяйстве, лесной и деревообрабатывающей промышленности: матер. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1999 г. / БГТУ. Минск, 1999. С. 25—29.

9. Н и к и т и н К. Е., Ш в и д е н к о А. З. Методы и техника обработки лесоводственной информации. М., 1978. — 270 с.

10. Б а г и н с к и й В. Ф., Е с и м ч и к Л. Д. Лесопользование в Беларуси. Минск, 1996. — 367 с.

11. М о и с е е н к о Ф. П. Возрасты рубки в эксплуатационных лесах II группы БССР // Сб. науч. раб. ин-та лесн. хоз-ва / БелНИИЛХ. Минск, 1960. Вып. 8. С. 139—153.

12. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР / Под ред. В. Ф. Багинского. М., 1984. — 30 с.

13. И с а е в А. С., К о р о в и н Г. Н. // Аэрокосмические методы и геоинформационные системы в лесоведении и лесном хозяйстве: матер. II Всерос. совещ., Москва, 1998 г. / РАН. М., 1998. С. 16—21.

Национальная академия наук Беларуси

14. Л у к ь я н ч и к о в Н. М., П о т р а в н ы й И. М. Экономика и организация природопользования. М., 2000. — 456 с.
15. Б а г и н с к и й В. Ф. Системный анализ в лесном хозяйстве. Гомель, 2009. — 168 с.
16. П и с а р е н к о А. И. // Лесное хозяйство. 2001. № 1. С. 2—6.
17. У т к и н А. И. // Лесоведение. 2001. № 2. С. 76—78.
18. Е р м а к о в В. Е. Лесоустройство. Минск, 1993. — 259 с.
19. А н т а н а й т и с В. В., З а г р е е в В. В. Прирост леса. М., 1981. — 200 с.
20. А т р о щ е н к о О. А. Лесная таксация. Минск, 2009. — 468 с.
21. Н и к и т и н К. Е. // ЭВМ и математические методы в лесном хозяйстве: Сб. тр. по матер. совещ. / ЛенНИИЛХ. Л., 1969. С. 9—17.
22. Б е р м а н т А. Ф. Курс математического анализа. М., 1954. Ч. 1. — 466 с.
23. Т ю р и н А. В. Основы хозяйства в сосновых лесах. М.; Л., 1952. — 112 с.

O. V. LAPITSKAYA

ECOLOGICAL VALIDITY OF MATURITY OF BIRCH AND ASPEN STANDS

Summary

Computations have been performed for ecological maturity of birch and aspen stands. The ecological maturity age of both normal and modal birch stands is 70 to 80 in relation to the site class, while the ecological maturity age of normal and modal aspen ones is 70 to 80 and 60 to 70, respectively.

Национальная академия наук Беларуси

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

УДК 538.945

В. Н. КУШНИР, С. Л. ПРИЩЕПА

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИК — ФЕРРОМАГНЕТИК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

(Поступила в редакцию 23.11.2010)

Обзор посвящен описанию свойств тонкопленочных гетероструктур типа сверхпроводник (S) — ферромагнетик (F). Описана история развития исследований S/F гетероструктур. Показано, как с накоплением знаний произошел переход от чисто научного интереса, вызванный антагонизмом двух физических явлений — сверхпроводимости и ферромагнетизма, к разработке практических устройств наноэлектроники и спинтроники. Подробно проанализированы условия возникновения принципиально нового квантового π-состояния макроскопических S/F объектов. Приводятся экспериментальные доказательства его существования. Большое место в обзоре занимает описание учета магнитных неоднородностей на сверхпроводящие свойства и эффект близости в искусственно синтезированных S/F гетероструктурах. Описываются первые экспериментальные доказательства реализации дальнодействующей триплетной компоненты. Указывается на необходимость учета влияния возможных вариаций энергии обмена в тонких пленках сплавных ферромагнетиков на возникновение сверхпроводящего состояния в S/F гетероструктурах.

В течение последних 15 лет были обнаружены нетривиальные свойства гибридных структур, состоящих из чередующихся слоев тонких пленок сверхпроводника (*S*) и ферромагнетика (*F*). Наиболее интересным из свойств, и с фундаментальной, и с прикладной точек зрения, является реализация сверхпроводимости в зависимости от материальных и геометрических параметров, в различных квантовых состояниях: так называемых 0 и π (что уже используется в π-контактных схемах наноэлектроники), состояниях «спинового вентиля», частотно-нечетных триплетных состояниях [1; 2]. Физическим яв-

Национальная академия наук Беларуси

лениям, сопряженным с названными свойствами, и посвящен данный обзор. Дается краткое изложение теоретических и экспериментальных исследований свойств *S/F* гетероструктур, в том числе с участием авторов. Вне рамок обзора остается не менее интересная, но еще недостаточно разработанная проблема состояний вихревой среды в *S/F* структурах и связанная с ней проблема управления критическими токами [3; 4].

Начальный этап исследований свойств *S/F* гетероструктур. Систематическое исследование свойств *S/F* гетероструктур открывает экспериментально-теоретическая работа [5] (1966 г.). В [5] результаты измерений критических температур бислоев Pb/Fe, Pb/Gd и Pb/Ni были проанализированы в рамках теории эффекта близости де Жена—Вертхамера [6], построенной ранее для структур сверхпроводник—нормальный металл (*N*); при этом влияние ферромагнетизма *F*-слоя на сверхпроводимость *S*-слоя учитывалось как обменное рассеяние куперовских пар на хаотически ориентированных локализованных магнитных моментах [7]. Хотя подобный подход и не совсем корректен (домены заменяются локализованными магнитными моментами), было получено хорошее согласие теоретических и экспериментальных зависимостей критической температуры T_c от толщины сверхпроводящего слоя d_S, что дало основание утверждать следующее. Во-первых, в *F*-слое индуцируется сверхпроводящий конденсат, и, во-вторых, обменное взаимодействие есть основной фактор подавления сверхпроводимости в *S/F* структуре (куперовские пары образованы электронами с противоположными спинами, обменное же взаимодействие в ферромагнетике стремится ориентировать спины электронов в одном направлении); при этом для глубины проникновения куперовских пар, например в Fe, была получена разумная оценка $\xi_F \approx 0{,}6$ нм.

Другой значимый эксперимент в это время был выполнен Мейнером и др. [8]. Они измерили зависимость сопротивления *R* от напряженности магнитного поля *H* для бислоев Py/Pb (Py — пермаллой, сплав Fe и Ni) в области перехода в сверхпроводящее состояние. Были обнаружены резкие максимумы *R* при значениях *H*, равных коэрцитивным полям, связанные с рассеянием спинов на доменных стенках. Метод Мейнера и др. в настоящее время широко используется для определения коэрцитивных полей *S/F* гетероструктур.

Следующий этап исследования сверхпроводимости в *S/F* гетероструктурах связан с развитием технологии осаждения тонких пленок в вакууме, что позволило получить более тонкие сплошные пленки (нанометровой толщины) высокого качества. Поскольку в тонкие пленки ферромагнетика куперовские пары проникают эффективно на всю глубину, появилась возможность изучать свойства *S/F* структур без ограничения на количество бислоев. В результате было установлено явление размерного кроссовера — переход от трехмерного к двумерному состоянию сверхпроводящего конденсата при увеличении внешнего параллельного слоям магнитного поля выше некоторого значения [9—12]. Данное явление присуще многослойным структурам любого типа (*S/N*, сверхпроводник/изолятор, сверхпроводник/полупроводник). Но в экспериментах Вонга и др. [9] было обнаружено и явление, выделившее *S/F* структуры в отдельный класс с уникальными свойствами, а именно, для многослойных структур V/Fe обнаружено немонотонное поведение зависимости

Национальная академия наук Беларуси

$T_c(d_F)$. (Это было первое наблюдение того, что сейчас называется π-состоянием). Впоследствии было показано, что данный факт есть проявление следующего фундаментального свойства *S/F* структур: обменное взаимодействие обусловливает не только сильное затухание конденсатной волновой функции в глубь ферромагнетика, но и ее осцилляции. В результате сверхпроводящее состояние *S/F* структур может реализоваться, в зависимости от геометрических и микроскопических параметров, в двух термодинамических состояниях — в 0-состоянии и π-состоянии (для трехслойных *S/F/S* структур, обладающих плоскостью зеркальной симметрии, параллельной слоям, 0-состоянию соответствует симметричная конденсатная волновая функция без нулей; π-состоянию соответствует антисимметричная волновая функция).

Осцилляционные эффекты, 0- и π-состояния. Возможность реализации 0- и π-состояний была предсказана в работе [13] для джозефсоновского *S/F/S* контакта, и, далее, в [14] — для *S/F/S* структур, сверхпроводящих в силу эффекта близости и удовлетворяющих условиям баллистического предела; при этом 0- и π-состояния должны обнаруживать себя осцилляциями критического тока I_c как функции толщины ферромагнитного слоя d_F. В работе [15] осциллирующие зависимости $I_c(d_F)$ были получены в диффузионном пределе микроскопической теории, что важно с экспериментальной точки зрения. В работах [16—19] было показано, что следствием осцилляций конденсатной волновой функции может быть немонотонное поведение (в частности, осцилляции) зависимости $T_c(d_F)$. При этом в работе [17] на основе точного решения уравнений Узаделя для сверхрешетки воспроизведены экспериментальные зависимости $T_c(d_F)$, полученные в [9] (выяснилось, однако, что с точки зрения проверки теории, экспериментальные данные, приведенные в [9], являются неполными). Наконец, в работе [20] были предсказаны осцилляции локальной плотности числа состояний. Существенно, что на названных зависимостях смена состояний отражается точками неаналитичности (или точками «кроссовера» состояний). Работами [13—20] были инициированы многочисленные эксперименты.

Немонотонная зависимость критической температуры от толщины *F*-слоя впервые после выхода работ [16—19] была обнаружена в экспериментах с трехслойными и многослойными структурами Nb/Gd [21; 22]. Пример измеренной зависимости $T_c(d_F)$ для Nb/Gd показан на рис. 1. Как видим из рис. 1, на зависимостях $T_c(d_F)$ имеет место излом при $d_F = d_F^* \sim 1{,}2$—$1{,}5$ нм с минимумом в этой точке; при этом значение d_F^* является, если следовать теории [17], точкой кроссовера между 0- (при $d_F < d_F^*$) и π- (при $d_F > d_F^*$) состояниями.

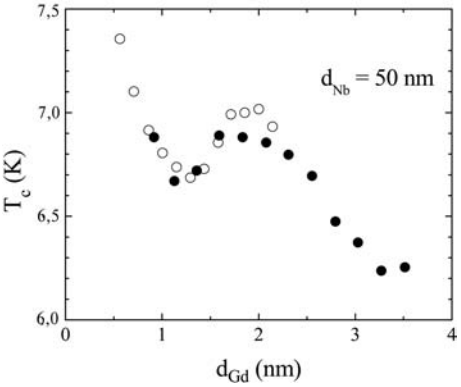

Рис. 1 [22]. Зависимости критической температуры T_c многослойной структуры Nb/Gd от толщины *F*-слоя d_F. Разные символы соответствуют разным сериям образцов

Фиттирование экспериментальных данных, проведенное в [21; 22], показа-

Национальная академия наук Беларуси

ло, что действительно, между теорией и экспериментом имеется качественное согласие. Почти сразу же аналогичный результат был получен для многослойных структур Nb/CuMn [12; 23; 24].

Тем не менее, работы [21—24] не были восприняты как безоговорочное экспериментальное доказательство существования π-состояния. Например, в [25; 26] для структуры Fe/Nb/Fe была также получена немонотонная зависимость $T_c(d_F)$, однако авторам этих работ не удалось описать экспериментальную характеристику количественно в рамках формализма, разработанного в [17]. В [25; 26] было предложено альтернативное объяснение (качественное), учитывающее наличие между слоями Nb и Fe тонкой нормальной прослойки Fe с утраченным ферромагнетизмом. Кроме работ, в которых немонотонная зависимость $T_c(d_F)$ толковалась не в пользу гипотезы о π-состояниях, в ряде экспериментов (на многослойных структурах V/Fe [27], Nb/Gd [28], $V/V_{1-x}Fe_x$ [29], Nb/Fe [30], двухслойных структурах Pb/Ni [31]) были получены характеристики $T_c(d_F)$ без осцилляций и признаков π-состояния. Любопытной особенностью характеристик, измеренных в [28; 30], является их ступенчатое изменение.

Таким образом, по результатам экспериментов [22—31] теория критического состояния в *S/F* структурах, изложенная в [16—19], далеко не полностью описывала экспериментальные данные. Причины этого в настоящее время вполне очевидны. Во-первых, было принято приближение полной прозрачности *S/F* границы (коэффициент квантовомеханической прозрачности $\tau = 1$). Во-вторых, в ряде случаев важен учет спин-орбитального рассеяния, а также рассеяния на парамагнитных примесях. Для полностью прозрачной *S/F* границы в условия сшивания конденсатной функции входит только отношение удельных сопротивлений двух металлов. Моделирование экспериментальных зависимостей $T_c(d_F)$ с этими условиями приводило к нефизическим значениям микроскопических параметров структур [27]. В реальных образцах *S/F* гетероструктур величина $\tau < 1$ в силу различных факторов (различия в скоростях Ферми, в кристаллических решетках, в зонных структурах и т. д.). Для *S/F* образцов поляризация спинов в *F* также снижает величину τ [32]. Это было продемонстрировано в ранних экспериментах по измерению критической толщины d_{cr} сверхпроводящих слоев V, при которой зарождается сверхпроводимость в многослойной структуре V/V_xFe_{1-x}, в зависимости от магнитного момента μ_F соединения V_xFe_{1-x} [29]. Результаты измерений показали, что по мере уменьшения μ_F путем разбавления Fe с помощью

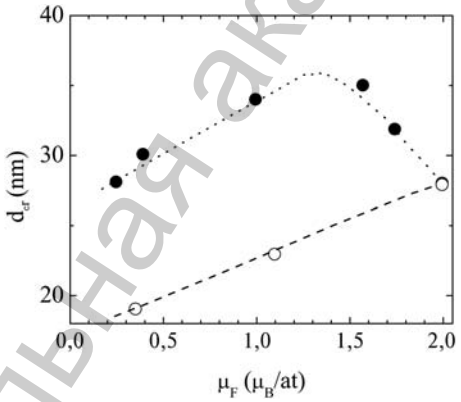

Рис. 2. [29]. Зависимость критической толщины сверхпроводящего слоя для зарождения сверхпроводимости d_{cr} для двух серий многослойных структур *S/F* в зависимости от магнитного момента ферромагнитного слоя μ_F. Открытые символы (справа налево): структуры V/Fe, V/Co, V/Ni. Закрытые символы (справа налево): структура V/V_xFe_{1-x} с $x = 0$; 0,12; 0,23; 0,47; 0,62; 0,66

Национальная академия наук Беларуси

V, значения d_{cr} вначале росли, а затем снижались с уменьшением μ_F, рис. 2. На первый взгляд, такое поведение $d_{cr}(\mu_F)$ аномально, так как ожидается снижение d_{cr} с уменьшением μ_F за счет более слабого обменного взаимодействия в Fe с бóльшим содержанием V. Объяснение экспериментального результата на рис. 2 качественно связано с тем, что уменьшение магнитного порядка конкурирует с ростом прозрачности *S/F* интерфейса. Количественно эта задача не решена до сих пор, так как для сильных ферромагнетиков расщепление спиновых подзон и итоговая разность в плотностях состояний для конфигураций «спин—вверх» и «спин—вниз» не могут быть отображены однозначно в условиях сшивания функций состояния диффузионного предела. Напротив, для слабых ферромагнетиков, у которых расщепление спиновых подзон мало, оказывается достаточным один параметр $\mathcal{T}$ для учета процессов туннелирования сквозь барьер, создаваемый *S/F* интерфейсом [29].

Еще одна серьезная проблема, связанная с использованием сильных ферромагнетиков в *S/F* гетероструктурах, состоит в том, что характерная длина существенного изменения конденсатной волновой функции оказывается не более 1 нм, а исследуемый диапазон изменения толщин *F*-слоев сводится к нескольким нанометрам (рис. 1). В результате диффузионный предел оказывается чересчур грубым для описания таких структур.

Отмеченные проблемы решались в серии теоретических и экспериментальных работ. В классической работе [33] была построена теория критического состояния *S/F* структур с учетом спин-орбитального рассеяния. Проблема описания критического состояния *S/F* структур с *F*-слоями из сильного ферромагнетика была рассмотрена, с учетом неполной прозрачности *S/F* границ, в серии статей Прошина и др. [34—37] и Тагирова и др. [38—41]. Уравнения теории в [34—36; 38; 39] были получены из уравнений Эйленбергера в диффузионном пределе с учетом первой поправки в разложении по параметру $\tau_F E_{ex}$ (τ_F — время свободного пробега электрона в ферромагнетике; E_{ex} — энергия обмена) и совпали по форме с уравнениями Узаделя, в которых коэффициент диффузии приобрел мнимую часть. (Вывод уравнений позднее был скорректирован в работах [42; 43].) В рамках развитого формализма получили объяснение известные в то время результаты экспериментов на *S/F* структурах. В частности, в работе [39] в результате прямого расчета структуры *S/M/F* (прослойка *M* представляет собой нормальный металл с высокой концентрацией центров парамагнитного рассеяния и имитирует магнито-мёртвый слой) дано объяснение ступенчатых зависимостей $T_c(d_F)$, полученных в [28], равно как и зависимости, приведенной на рис. 1. Результаты теории [34—41] были подтверждены в последующих экспериментах с многослойными структурами Nb/Co [44; 45], V/Co [44], Nb/Fe/Cu [46], Fe/Pb/Fe [47], Fe/V/Fe [48], Nb/Co/Nb [49; 50], пятислойной структурой Co/Nb/Co/Nb/Co [49; **50] и двухслойны**ми структурами Nb/CuNi [51—53], Nb/Ni [54], Nb/PdNi [55—57].

В работах [34—36; 38; 39] было предсказано еще одно «осцилляционное» явление, а именно, явление «возвратной сверхпроводимости», обнаруженное вскоре (не совсем отчетливо) на эксперименте со структурами Fe/V/Fe [48]. Хорошо выраженный эффект был получен в эксперименте Здравкова и др. на двухслойных структурах $Nb/Cu_{0,49}Ni_{0,51}$ [58]. Этой же группой обнаружен (пред-

Национальная академия наук Беларуси

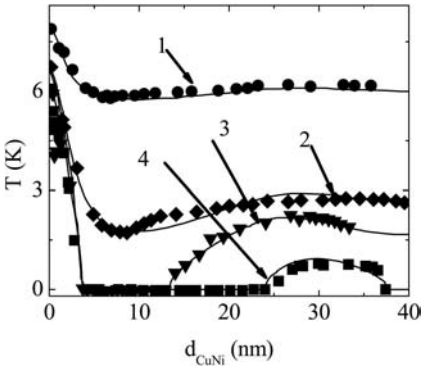

Рис. 3 [59]. Экспериментальные (символы) и теоретические (сплошные линии) зависимости $T_c(d_F)$ структуры Nb/$Cu_{0,41}Ni_{0,59}$ для разных толщин Nb: *1* – dNb ≈ 14,1 нм, *2* – dNb ≈ 7,8 нм, *3* – dNb ≈ 7,3 нм, *4* – dNb ≈ 6,2 нм. Кривая *3* соответствует возвратной сверхпроводимости, кривая *4* – двойному исчезновению сверхпроводимости

сказанный Тагировым [38]) эффект двойного исчезновения сверхпроводимости [59], наблюдаемый при очень малых толщинах d_S = 6,2 нм (рис. 3). Явление исчезновения и возврата сверхпроводимости, вероятно, наиболее выразительное проявление осцилляций конденсатной волновой функции в *F*-слое. Авторы работы [60] трактуют данное явление как интерференцию прямой и отраженной конденсатных волн.

Обратим еще раз внимание на то, что характерная длина изменения функции $T_c(d_F)$ для структур с *F*-слоями из сильных ферромагнетиков составляет не более 1 нм, а вся картина смены состояний «разыгрывается» на интервале толщин d_F ~ 0—4 нм (рис. 1). Данное обстоятельство осложняет наблюдение критических характеристик из-за большой относительной величины неоднородностей ферромагнитных слоев. В то же время для структур со слабыми, или «разреженными», ферромагнетиками (ферромагнитными сплавами с достаточно малой величиной обменного потенциала E_{ex} ~ 100—300 K) характерный интервал изменения функции $T_c(d_F)$ расширяется до d_F ~ 40 нм (рис. 3). Впервые *S*/*F* структуры со слабым ферромагнетиком ($Cu_{1-x}Ni_x$) предложено использовать в качестве объекта исследования группой Рязанова [61; 62]. В результате измерений плотности критического тока J_c в зависимости от температуры, внешнего магнитного поля, а также зависимостей $J_c(d_F)$, проведенных на структурах Nb/$Cu_{1-x}Ni_x$/Nb, были получены явная картина осцилляций критического тока и первое бесспорное доказательство существования π-состояний [63] (см. также [64—67]). Одна из измеренных зависимостей плотности критического тока от толщины *F*-слоя, демонстрирующей переходы 0—π, π—0, приведена вместе с теоретической зависимостью на рис. 4 [67]. Кроме того, в [63—67] были получены осциллирующие зависимости $J_c(T)$ и $J_c(H)$. Почти одновременно с работами Рязанова и др. выходят и работы других групп экспериментаторов, в которых также представлены осциллирующие зависимости $J_c(d_F)$ с явно выраженными 0—π кроссоверами (см., в частности, [68—72]).

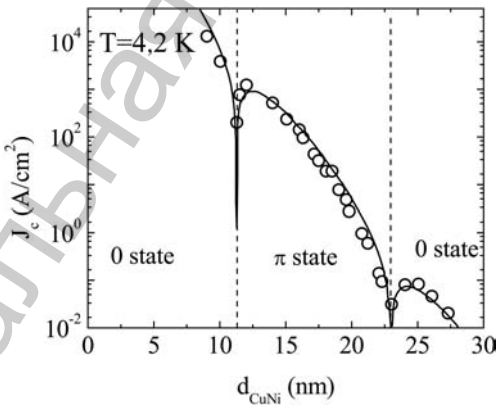

Рис. 4 [67]. Экспериментальная и теоретическая зависимости критического тока структуры Nb/$Cu_{0,47}Ni_{0,53}$/Nb от толщины *F*-слоя

Выбор в качестве объекта исследований *S*/*F* структур со слабыми фер-

Национальная академия наук Беларуси

ромагнетиками определил и достаточный теоретический аппарат для их описания, а именно, уравнения Узаделя, дополненные условиями сшивания Куприянова—Лукичева [73] (либо условиями для спин-активных *S/F* границ [74]); мнимая поправка к коэффициенту диффузии в этих уравнениях оказывается уже излишней. В работах [42; 75] разработан точный метод решения граничной задачи для уравнений Узаделя, описывающих критическое состояние двухслойных (или трехслойных) структур и сверхрешеток (обобщение метода, предложенного в [17]). В работе [76] дан анализ влияния спин-орбитального рассеяния и рассеяния с переворотом спина на характеристики $T_c(d_F)$, $J_c(d_F)$ при различных значениях параметра квантовомеханической прозрачности *S/F* границы.

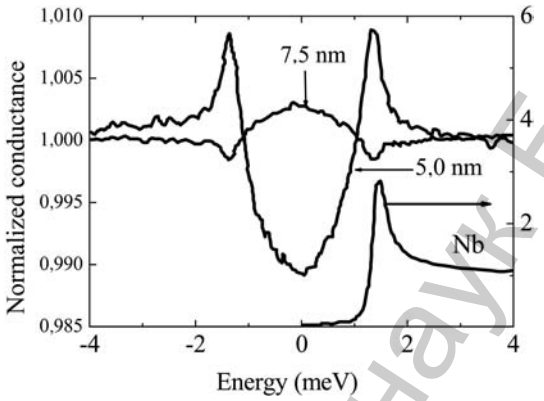

Рис. 5 [78]. Спектральная плотность числа состояний в окрестности уровня Ферми $N_F(\varepsilon)$ в ферромагнетике, измеренная для структуры Nb/PdNi/Nb при толщинах ферромагнитного слоя $d_F = 5$ нм (0-состояние) и $d_F = 7{,}5$ нм (π-состояние). (Нормализованный кондактанс равен нормированной плотности числа состояний $N_F(\varepsilon)/N_F(0)$). Характеристика $N_F(\varepsilon)/N_F(0)$ сверхпроводящего ниобия приведена для сравнения

Еще одним доказательством существования π-состояния явилось измерение плотности числа состояний на поверхности Ферми $N_F(\varepsilon)$ в *S/F/S* контактах при различных толщинах d_F. Известно, что $N_F(\varepsilon)$ обращается в ноль в сверхпроводнике. В *S/N/S* контактах вследствие эффекта близости плотность числа состояний в нормальном металле снижается [77]. В *S/F/S* структурах, находящихся в состоянии «0», эффект аналогичен. Однако в π-контакте $N_F(\varepsilon)$ в *F* становится выше, чем в отсутствии сверхпроводника. Такой осциллирующий характер зависимости $N_F(\varepsilon)$ от d_F был предсказан А. Буздиным [20] и экспериментально подтвержден на структурах Nb/PdNi/Nb [78], рис. 5.

Результаты эксперимента [78] моделировались в работе [79] в чистом пределе в рамках квазиклассического приближения. Было получено хорошее согласие теоретических кривых $N_F(\varepsilon)/N_F(0)$ с экспериментальными зависимостями (но при очень низком значении коэффициента прозрачности $\mathcal{T}$). В [80] приведены характеристики $N_F(\varepsilon)$ для двухслойных структур Nb/CuNi, также демонстрирующие аномальное поведение, аналогичное π-контакту при $d_F > d_F^*$; моделирование экспериментальных данных проводилось на основе уравнений Узаделя с учетом процессов релаксации спина в ферромагнитном слое. Строгий метод расчета плотности числа состояний в рамках диффузионного приближения, с учетом спин-орбитального и парамагнитного рассеяния, для *S/F* структур (в том числе) впервые был предложен в [81].

Обращение в ноль сверхпроводящего параметра порядка в *S/F/S* π-контактах приводит к более сильному «развязыванию» соседних *S* слоев, что должно проявляться увеличением анизотропии *S/F/S* гетероструктур для $d_F \sim d_F^*$ [82]. Подобный эффект был экспериментально обнаружен в [83].

Национальная академия наук Беларуси

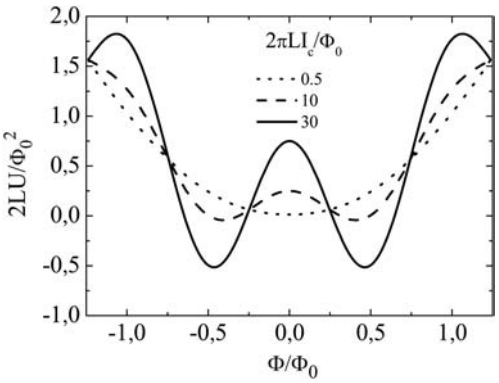

Рис. 6 [85]. Свободная энергия сверхпроводящего π-кольца в зависимости от магнитного потока через него для разных значений параметра $\gamma = 2\pi L I_c/\Phi_0$

Первая работа, посвященная π-контакту, рассматривала сверхпроводящее кольцо, замкнутое слабой связью, представляющее собой магнитный материал [13]. Такая топология хорошо известна как высокочастотный (вч) сверхпроводящий квантовый интерференционный детекор (СКВИД). Известно, что для вч СКВИДа важно соотношение между индуктивностью кольца L и критическим током слабой связи I_c [84]. Для $2\pi L I_c > \Phi_0$ (Φ_0 — квант магнитного потока), квантовые состояния вч СКВИДа дискретны и переходы между соседними состояниями при изменении внешнего магнитного потока дискретны и необратимы. На этом принципе основаны сенсорные свойства вч СКВИДа. В противоположном случае, $2\pi L I_c < \Phi_0$, квантовые состояния перекрываются, переходы межу ними непрерывны и обратимы. Если слабая связь представляет π-контакт, то в кольце вч СКВИДа появляется спонтанный вихрь [13]. Основное состояние такой конфигурации характеризуется спонтанным циркулирующим током и магнитным потоком, направленным перпендикулярно плоскости кольца. При $2\pi L I_c < \Phi_0$ системе энергетически выгодно минимизировать свою магнитную энергию по сравнению с энергией слабой связи, что приводит к постоянству фазы волновой функции во всем кольце. В этом случае ожидается смещение фазы на $\Phi_0/2$. С другой стороны, при $2\pi L I_c > \Phi_0$, минимум энергии кольца соответствует минимуму энергии слабой связи, что вызывает градиент фазы при обходе кольца [13]. Это, в свою очередь, приводит к генерации спонтанного циркулирующего тока в сверхпроводящем кольце, замкнутом π-переходом, создающим половину кванта магнитного потока. В результате магнитный поток внутри кольца принимает значения $\Phi = (n + 1/2)\Phi_0$. Этот спонтанный сверхток будет протекать в кольце даже в отсутствии внешнего магнитного поля. (При этом предполагается, что циркулирующий спонтанный сверхток меньше критического тока слабой связи.) Эта ситуация приведена на рис. 6, где показана свободная энергия π-кольца в отсутствии внешнего магнитного поля как функция нормированного потока через кольцо для разных значений параметра $\gamma = 2\pi L I_c[T, (d_F/\xi_F)]/\Phi_0$ [85]. Для $\gamma > 1$ происходит фазовый переход в π-кольце в вырожденное основное состояние с двумя минимумами, соответствующими половине кванта потока, $\Phi = \pm\Phi_0/2$. Первое экспериментальное наблюдение спонтанного сверхтока в π-кольце было получено в работе [85]. Использовались переходы Nb/PdNi/Nb. Присутствие спонтанных токов проявлялось в увеличении магнитного момента π-кольца с уменьшением температуры. Таким образом, π-кольцо можно рассматривать как двухуровневую квантовую систему с возможностью микроскопического квантового туннелирования между двумя состояниями, что является прототипом квантового

Национальная академия наук Беларуси

бита. Заметим, что данные рассмотрения справедливы для кольца с любым нечетным количеством π-контактов [86].

Эффект спинового переключения, триплетные состояния. Кроме «осцилляционных» эффектов в *S*/*F* структурах обнаруживаются явления, обусловленные макроскопическими неоднородностями магнитных свойств ферромагнитных слоев. Если направление вектора намагниченности меняется в одном *F*-слое (что связано с наличием крупных доменов), либо направление вектора обменного поля $\mathbf{E}_{ex}$ меняется от *F*-слоя к *F*-слою, то неизбежно возникают триплетные составляющие сверхпроводящего конденсата; исключение составляет случай антипараллельных векторов обменного поля.

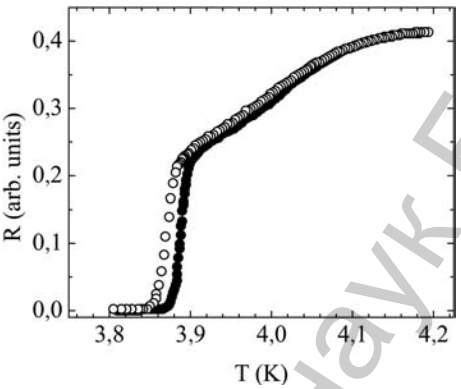

Рис. 7 [101]. Резистивные характеристики структуры Ni(1,8 нм)/V/Ni(4 нм) при параллельных (сплошные символы) и антипараллельных (открытые символы) векторах намагниченности слоев ферромагнетика

Случай антипараллельных векторов обменного поля в ферромагнитных слоях трехслойной структуры *F*/*S*/*F* был рассмотрен в работах Тагирова [87] и Буздина и др. [88]. Полученный теоретический эффект «спинового переключения» $\Delta T_{P,\,AP} = T_{AP} - T_P > 0$ (T_P, T_{AP} — критические температуры структуры с параллельной и антипараллельной ориентацией $\mathbf{E}_{ex}$ в *F*-слоях) оказался малым, но, тем не менее, был обнаружен в экспериментах со структурой CuNi/Nb/CuNi в работе [89] (экспериментальное значение $\Delta T_{P,\,AP} \sim 6$ мК) и воспроизведен в [90]. В работах [91—94] был достигнут эффект от нескольких десятков до 200 мК [92; 93]. Между тем, в экспериментах [95—101] наблюдался и «обратный» эффект $\Delta T_{P,\,AP} < 0$ (рис. 7), хотя, в соответствии с расчетами [102], теоретический эффект всегда положителен. В работе [103] продемонстрировано, что эффекта переключения можно достичь на двуслойной структуре (эксперимент проводился на структуре Py/Nb), если на свойства *F*-слоя существенное влияние оказывают доменные стенки. Более сложные структуры, а именно *F*/*S*/*F*′/*S*′, с антипараллельными векторами обменного поля в слоях *F* и *F*′ были рассмотрены в работах [37; 104]. В силу большого набора состояний эти структуры выглядят весьма перспективными для приложений.

Изменение взаимной ориентации векторов обменного поля с параллельной на антипараллельную имеет следствием не только изменение критической температуры, но и критического тока I_c. При этом оценки критического тока для структуры *S*/*F*/*I*/*F*/*S*, выполненные в [105], показали возможность значительного его увеличения. К аналогичному результату пришли авторы работы [106], рассматривая два массивных сверхпроводника с тонкими слоями ферромагнетика (в этом случае параметр порядка в сверхпроводнике можно принять постоянным) и прослойкой диэлектрика в двух предельных случаях, высокой и низкой прозрачности *S*/*F* интерфейса. В работе [107] таже система с полубесконечными сверхпроводниками, но с *F*-слоями произвольной тол-

Национальная академия наук Беларуси

щины, рассмотрена на основе точного (численного) решения уравнений Узаделя при произвольной прозрачности *S/F* границы. В работах [108] критический ток при параллельных и антипараллельных векторах намагниченности рассчитывался (в качестве одной из задач) для достаточно сложной системы *S/F—N—F/S* (между двумя слоями сверхпроводника расположена перпендикулярно их поверхности трехслойная структура *F/N/F*); при этом решалась, очевидно, двумерная граничная задача. Более подробную информацию об эффекте спинового переключения можно найти в [109].

Относительно триплетной составляющей сверхпроводящего конденсата в *S/F* структурах необходимо следующее уточнение. Основной физической величиной, описывающей конденсат (на языке горьковских функций Грина), является двухчастичная аномальная функция Грина $F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_1, \tau_1; \mathbf{r}_2, \tau_2)$ (здесь τ — температурная переменная, или мнимое время), удовлетворяющая в силу принципа Паули условию антисимметрии $F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_1, \tau_1; \mathbf{r}_2, \tau_2) = -F_{\beta\alpha}(\mathbf{r}_2, \tau_2; \mathbf{r}_1, \tau_1)$. Триплетному состоянию соответствует симметричная по спиновым переменным α, β функция $F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_1, \tau_1; \mathbf{r}_2, \tau_2)$. Существуют сверхпроводящие материалы, в которых обнаруживает себя *p*-волновая сверхпроводимость (Sr_2RuO_4 [110; 111]), которой соответствует антисимметричная по перестановке координат и, соответственно, симметричная относительно перестановки температурных переменных функция $F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}_1, \tau_1; \mathbf{r}_2, \tau_2)$. Возможность другого типа триплетного спаривания, описываемого пространственно-симметричной и антисимметричной по переменным τ_1, τ_2 аномальной функцией Грина, впервые рассмотрена в работе [112] в связи с проблемой существования нескольких сверхтекучих фаз He^3. В работах группы Бержерет—Волков—Ефетов [113—115] показано, что именно такой тип (нечетного по мацубаровским частотам) триплетного спаривания реализуется в *S/F* структурах, удовлетворяющих условиям диффузионного предела. В качестве примера в [113; 116] была рассмотрена *S/F/S* структура с локальной неоднородностью намагниченности ферромагнетика вблизи *S/F* интерфейса (спиральная доменная стенка). В [114; 115] рассмотрена многослойная структура с неколлинеарными векторами обменного поля в различных *F*-слоях. В результате оказалось, что синглетная и триплетная компоненты одного порядка вблизи *S/F* границы; но при этом две триплетные компоненты (↑↑ и ↓↓) распространяются в глубь ферромагнетика на характерную длину $\xi_F = \sqrt{D_F / 2\pi T_c}$ (как в нормальном металле), много большую характерной длины затухания $\zeta_F = \sqrt{D_F / E_{ex}}$ синглетной компоненты (рис. 8). Это объясняется достаточно просто тем, что сверхпроводящая пара электронов с параллельными спинами не разрушается обменным взаимодействием. В соответствии с расчетами [114; 115] при

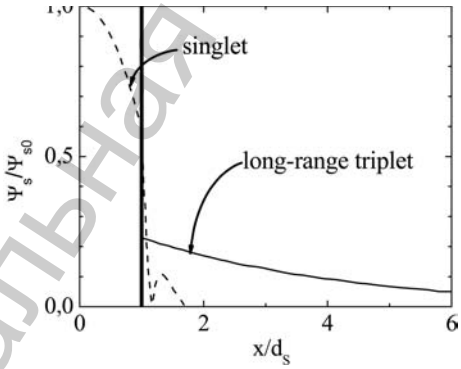

Рис. 8 [114]. Нормализованные синглетная (четная функция) и триплетная (нечетная функция) компоненты конденсатной волновой функции структуры *F/S/F* с неколлинеарными векторами намагниченности

Национальная академия наук Беларуси

толщинах ферромагнитного слоя $\zeta_F << d_F << \xi_F$ триплетная компонента обнаруживает себя аномально большим критическим током, достигающим максимума при взаимно ортогональных векторах обменного поля в соседних *F*-слоях. Это может служить объяснением значительного увеличения низкотемпературной проводимости на больших расстояниях в глубь ферромагнетика, наблюдавшегося на экспериментах [117; 118].

Решение уравнений Узаделя, построенное в [113—116], основано на допущении однородности параметра порядка в *S*-слоях, что является практически точным для системы, состоящей из массивных сверхпроводников и ферромагнитной нити между ними; однако для слоистых структур с *S*-слоями конечной толщины это допущение оказывается чересчур сильным. В работе [102] было построено точное решение линеаризованных уравнений Узаделя для произвольной трехслойной структуры *F*/*S*/*F* с векторами обменного поля $\mathbf{E}_{ex} = E_{ex}(0, \pm\sin\alpha, \cos\alpha)$ в соседних *F*-слоях (ось *OX* направлена перпендикулярно поверхности слоев). В работе [119] метод вычислений, использованный в [102], обобщен на случай несимметричной трехслойной структуры *F*1/*S*/*F*2, что автоматически включает в рассмотрение и пятислойные структуры вида *F*1/*S*/2*F*2/*S*/*F*1. Для исследования триплетных состояний структуры *F*/*S*/*F* при $T < T_c$ в работе [120] использован метод, основанный на параметризации Риккати [121] (рассчитывались парные амплитуды, распределение намагниченности, магнитный момент образца), разработанный для решения уравнений диффузионного предела в [122]. В [122] на основе этого метода были рассмотрены также и баллистические *S*/*F*/*S* структуры с доменной стенкой в *F*-слое. В [123; 124] рассмотрены в диффузионном пределе двухслойные *S*/*F*, и в [125] — трехслойные *S*/*F*/*S* структуры с мультидоменной структурой ферромагнитного слоя; в [126] исследованы структуры с геликоидальным ферромагнетиком, в [127] — двухслойная структура с узкой доменной стенкой.

Своеобразным предельным случаем является структура *S*/*HM*/*S* (*HM* — полуметалл), рассмотренная в [128]. Синглетная сверхпроводимость в *HM*-слое исключена ввиду полной его поляризации по спину. В [128] показано, что в чистом пределе для спин-активного *S*/*HM* интерфейса, так что имеет место рассеяние с переворотом спина, возможно индуцирование в *HM*-слое триплетной компоненты сверхпроводящего конденсата. В результате *S*/*HM*/*S* контакт может переносить сверхпроводящий ток. Работой [128] был стимулирован эксперимент на структуре NbTiN/CrO_2/NbTiN [129], в котором действительно наблюдался джозефсоновский сверхток сквозь слой CrO_2 толщиной в 310 нм, хотя воспроизводимость результатов была слабой, критический ток I_c изменялся от образца к образцу на 2 порядка. Данный эксперимент инициировал серию теоретических работ [130—134] по исследованию *S*/*HM*/*S* структур. В частности, в [130] показано, что *p*-волновая частотно-четная и *s*-волновая частотно-нечетная компоненты дают вклад одного порядка в функцию состояния в ферромагнетике *S*/*F*/*S* структуры со спин-активными *S*/*F* интерфейсами в чистом пределе. Результаты эксперимента [129] подробно обсуждались в [131—133] (см. также [135]). В [132; 133] показано, что более прямое подтверждение существования триплетных состояний в структурах *S*/*HM*/*S* может быть получено из измерений плотности числа состояний.

Национальная академия наук Беларуси

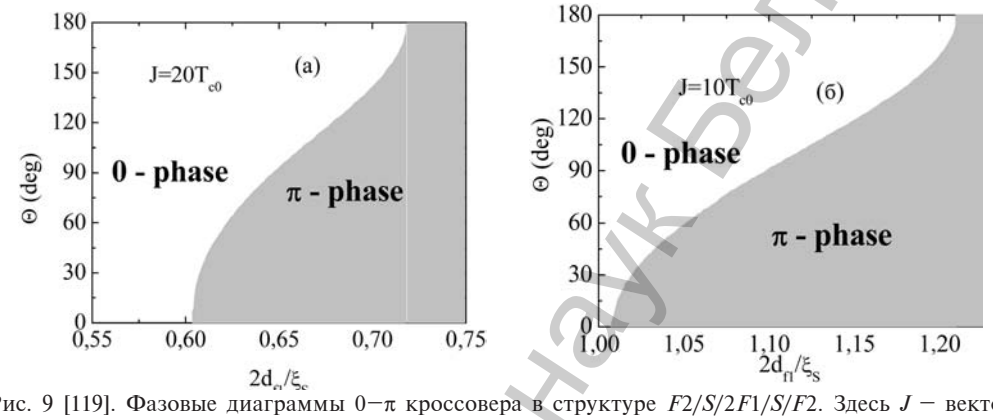

Рис. 9 [119]. Фазовые диаграммы 0−π кроссовера в структуре $F2/S/2F1/S/F2$. Здесь J − вектор обменного поля

Кроме эксперимента со структурой $S/HM/S$ [129], были проведены эксперименты на системах Al/Ho/Al (Ho является геликоидальным ферромагнетиком) [136; 137] и Nb/F*/Nb [138—140] (F* — блок слоев, включающий, в частности, слои сильного ферромагнетика Co с прослойками антиферромагнетика и слабых ферромагнетиков PdNi или CuNi); результаты этих экспериментов можно трактовать с позиции нечетно-частотных триплетных состояний. В эксперименте [136] признаком генерации триплетной компоненты в структурах Al/Ho/Al явилось наблюдение фазово-когерентных осцилляций при изменении длины проводов из Ho в геометрии Андреевского интерферометра. При этом фазовая когерентность сохранялась для длин Ho до 150 нм, что много больше ξ_F в Ho ($\xi_{F,\ \mathrm{Ho}}$ ~ 1 нм [129]). В экспериментах [137; 140] доказательством триплетной компоненты служило, как и в [129], наличие джозефсоновского тока для толщин ферромагнетика d_F, намного больше ξ_F (d_F ~ 10—30 нм). Заметной особенностью работы [140] является то, что были получены образцы с воспроизводимыми значениями I_c.

Доменная структура ферромагнетика с различной ориентацией намагниченности и наличие доменных стенок должны быть учтены при разработке спиновых вентилей [103]. Подробное исследование влияния доменных стенок на сверхпроводящие свойства бислойных структур Nb/CuNi было проведено в [141]. Основной результат этой работы заключается в том, что наблюдаемые для образцов CuNi/Nb/CuNi значения $\Delta T_{P,\ AP}$ в несколько милликельвин [89; 90] могут быть вызваны простым стимулированием сверхпроводимости в доменных стенках неелевского типа при перемагничивании образца. Использование сплава Py для сверхпроводниковых вентилей также создает немало трудностей. Известно, что в пермаллое могут наблюдаться доменные стенки как блоховского (для d_F > 20 нм), так и неелевского (для d_F < 20 нм) типов [142]. При этом для блоховских доменных стенок наблюдается стимулирование вихрей с понижением T_c [143], а для неелевских доменных стенок — стимулирование сверхпроводимости [103].

Завершая тему триплетных состояний, отметим, что в большинстве перечисленных работ (см. также [144 — 146]) подробно исследовалось влияние не-

Национальная академия наук Беларуси

однородной намагниченности на 0—π кроссовер и на величину осцилляционных эффектов. На рис. 9 приведена фазовая диаграмма, отображающая области значений в пространстве параметров (d_{F1}, θ) пятислойной структуры $F2/S/2F1/S/F2$, соответствующие 0- и π-состояниям (параметр θ — угол между векторами обменного поля в центральном и внешних F-слоях) [119]. На рис. 10 приведены зависимости критической температуры от толщины F-слоя, рассчитанные в [102] при нескольких углах 2α между векторами обменного поля в F-слоях трехслойной структуры $F/S/F$. Рис. 9, 10 достаточно хорошо иллюстрируют эффект спинового переключения с углом рассогласования намагниченностей в качестве управляющего параметра. Как показано в [147], триплетная компонента генерируется в структуре $S/F1/F2$, при этом возможные изменения ΔT_c могут достигать нескольких градусов.

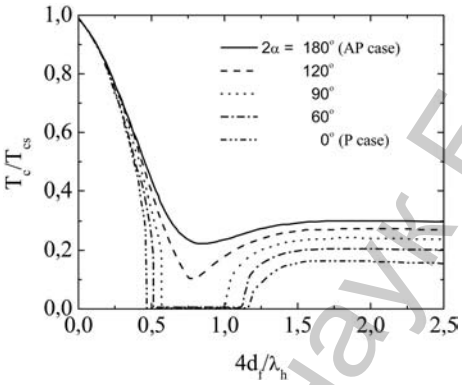

Рис. 10 [102]. Критическая температура структуры $F/S/F$ в зависимости от толщины F-слоя, нормализованной на период осцилляций синглетной компоненты

Магнитные неоднородности и уширение резистивных характеристик *S/F* гетероструктур. В последние годы в многочисленных экспериментальных работах было показано, что такие слабые ферромагнетики, как $Cu_{1-x}Ni_x$ [61; 63] и $Pd_{1-x}Ni_x$ [78], представляют наибольший интерес с практической точки зрения для реализации различных устройств спинтроники и цифровой электроники [1; 148; 149]. В таких системах обменная энергия контролируется через изменение содержания Ni, а сверхпроводящий параметр порядка проникает в F-слои на глубину до десятков нанометров [59].

Известно, что ферромагнитный порядок устанавливается в сплавах $Pd_{1-x}Ni_x$ для гораздо меньшей концентрации Ni, чем в $Cu_{1-x}Ni_x$. Поскольку Pd — это металл с высокой магнитной восприимчивостью [150], пороговая концентрация Ni в нем, x_c, которая приводит к ферромагнетизму, очень мала, $x_c \approx 0{,}02$ [151]. С другой стороны, Cu в чистом виде — это слабый диамагнетик и ферромагнитный порядок в $Cu_{1-x}Ni_x$ устанавливается для $x_c \approx 0{,}43$ [152]. Вследствие такого различия в x_c для $Cu_{1-x}Ni_x$ и $Pd_{1-x}Ni_x$ соединений ожидается, что структурный беспорядок должен быть меньше в $Pd_{1-x}Ni_x$ [153]. Действительно, в сплавах $Cu_{1-x}Ni_x$ наблюдаются нанокластеры Ni, состоящие из 20—30 атомов, со средним размером $\varnothing_{кл} \approx 10$ нм [154]. В $Pd_{1-x}Ni_x$ сегрегация Ni существенно слабее и нанокластеры Ni образованы лишь несколькими атомами, средний размер нанокластеров $\varnothing_{кл} \approx 2$—3 нм [155]. Нанокластеры Ni с подобными размерами все еще обладают ферромагнитными свойствами [156]. В результате разная степень магнитного беспорядка оказывает различное влияние на характер перехода в сверхпроводящее состояние $S/F/S$ гетероструктур [157—159]. На рис. 11 показана зависимость температуры начала и конца резистивного перехода в сверхпроводящее состояние от толщины ферромагнитного слоя d_F для трехслойных структур $Nb/Cu_{0,41}Ni_{0,59}/Nb$. Видно, что в окрест-

Национальная академия наук Беларуси

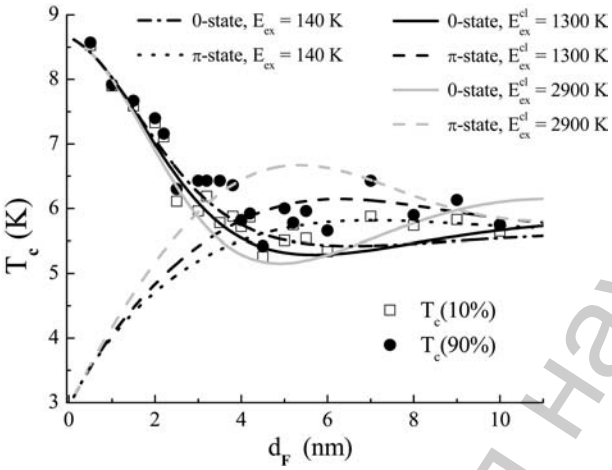

Рис. 11 [159]. Зависимость критической температуры T_c от толщины слоя $Cu_{0,41}Ni_{0,59}$, d_F, в трехслойных структурах $Nb/Cu_{0,41}Ni_{0,59}/Nb$. Эксперимент: сплошные точки соответствуют началу перехода T(0,9Rn), открытые квадраты — концу перехода T(0,1Rn). Теория: штрихпунктирная и пунктирная линии относятся соответственно к 0 и π

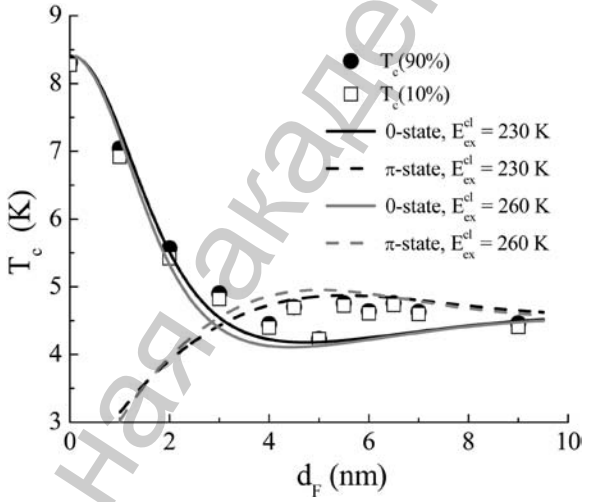

Рис. 12 [83]. Зависимость критической температуры T_c от толщины слоя $Pd_{0,81}Ni_{0,19}$, d_F, в трехслойных структурах $Nb/Pd_{0,81}Ni_{0,19}/Nb$. Эксперимент: сплошные точки соответствуют началу перехода T(0,9Rn), открытые квадраты — концу перехода T(0,1Rn). Теория: сплошные и штриховые линии относятся к 0- и π-состояниям с варьируемым значением энергии обмена в плоскости пленки

ности 0—π кроссовера ($d_F \approx$ 4 нм) наблюдается заметное уширение переходов, с 0,1 до 0,6 K [157]. На рис. 12 показана аналогичная зависимость для структур $Nb/Pd_{0,81}Ni_{0,19}/Nb$ [83]. В этом случае уширение не наблюдается.

Эффект уширения объясняется в [157; 158] следующими причинами. В области кроссовера, в силу неоднородностей структуры (хотя бы слабых) трехслойная структура разбивается на $S/F/S$ блоки, находящиеся либо в 0-, либо в π-состояниях. В результате формируются сетка джозефсоновских 0- и π-переходов. В паре 0—π возможно возникновение локального спонтанного (замкнутого) тока. В этом случае транспортный ток, необходимый для измерения резистивной характеристики, распадается на совокупность хаотических токов, что и приводит к конечному сопротивлению. Однако данная трактовка недостаточна для объяснения наличия уширения резистивной характеристики в $Nb/Cu_{0,41}Ni_{0,59}/Nb$ и его отсутствия в $Nb/Pd_{0,81}Ni_{0,19}/Nb$. Проблема была решена в [159] на основе простого наблюдения сильного влияния вариаций обменного потенциала на характеристику $T_c(d_F)$, в частности, на положение точки кроссовера. Ощутимые вариации обменной энергии происходят в слое $Cu_{1-x}Ni_x$ вследствие заметной кластеризации Ni. Линии на рис. 11 и 12 представляют результаты расчетов с учетом измения обменной энергии в кластерах Ni, E_{ex}^{cl} [38; 160]. Из подгонки теории к экспериментальным данным следует, что вариации E_{ex}^{cl}

Национальная академия наук Беларуси

в $Cu_{0,41}Ni_{0,59}$ составляют от 140 K (E_{ex} для этого сплава [42]) до 2900 K, что совпадает с E_{ex} в пленках Ni [161]. В то же время для $Pd_{0,81}Ni_{0,19}$ максимально возможное изменение E_{ex}^{cl} составляет от 230 K (E_{ex} для этого сплава [55]) до 260 K, что свидетельствует о магнитной однородности пленок $Pd_{0,81}Ni_{0,19}$. Далее, поскольку участки *S/F/S* с «большими» кластерами Ni находятся в π-состоянии, они обладают более высокой проводимостью [38—41]; именно через эти участки и происходит замыкание транспортного тока.

Гораздо сложнее объяснить уширение резистивных характеристик для многослойных *S/F* структур [162]. Одно из возможных объяснений основано на концепции многомодового фазового перехода, выдвинутой в [163].

Заключение. В данном обзоре кратко проанализирован современный уровень исследований свойств металлических *S/F* гетероструктур. Показано, что в последние годы достигнут заметный прогресс, хотя на некоторые вопросы пока нет достаточно внятного ответа.

Надежно установлена возможность существования π-состояния в слоистых *S/F* структурах, описываемого волновой функцией с узлами в каждом *F*-слое. Наличие π-состояний приводит к возможности создания принципиально новых приборов наноэлектроники и спинтроники, таких как π-контакты квантовые компьютеры, спиновые вентили, токовые переключатели.

Остается мало исследованным влияние рассеяния электронов с переворотом спина на *S/F* границе. Не изучено в достаточной степени влияние доменной структуры ферромагнитной пленки на переключающие свойства спиновых *S/F* вентилей. В связи с этим перспектива токовых переключателей выглядит на сегодняшний день весьма туманно. Необходимы исследования влияния неоднородностей обменного потенциала в многослойных *S/F* структурах на их свойства. Триплетные корреляции в или через доменные стенки пока не были подтверждены экспериментально, отчасти из-за сложности контроля их свойств. Устройства с наноразмерами могут помочь в решении этой проблемы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф10Р-063).

Литература

1. B u z d i n A. I. // Rev. Mod. Phys. 2005. Vol. 77, № 3. P. 935—976.
2. B e r g e r e t F. S., V o l k o v A. F., E f e t o v K. B. // Rev. Mod. Phys. 2005. Vol. 77, № 4. P. 1321—1373.
3. L y u k s y u t o v I. F., P o k r o v s k y V. L. // Adv. Phys. 2005. Vol. 54, № 1. P. 67—136.
4. A l a d y s h k i n A. Y., S i l h a n e k A. V., G i l l i j n s W., M o s h c h a l k o v V. V. // Superc. Sci. Techn. 2009. Vol. 22, № 5. P. 053001(1—48).
5. H a u s e r J. J., T h e u e r e r H. C., W e r t h a m e r N. R. // Phys. Rev. 1966. Vol. 142, № 1. P. 118—126.
6. Д е Ж е н П. // Сверхпроводимость металлов и сплавов. М., 1968. С. 280.
7. А б р и к о с о в А. А., Г о р ь к о в Л. П. // ЖЭТФ. 1960. Т. 39, вып. 6(12). С. 1781—1796.
8. M e u n i e r F., B u r g e r J. P., D e u t s c h e r G., v a n D a l e n P. A. // Phys. Lett. 1967. Vol. 24A, № 13. P. 722—724.
9. W o n g H. K., J i n B. Y., Y a n g H. Q. et al. // J. Low Temp. Phys. 1986. Vol. 63, № 3/4. P. 307—315.
10. H o m m a H., C h u n C. S. L., Z h e n g G.-G., S c h u l l e r I. K. // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 33, № 5. P. 3562—3565.

Национальная академия наук Беларуси

11. K o o r e v a a r P., C o e h o o r n R., A a r t s J. // Physica C. 1995. Vol. 248, № 1/2. P. 61—70.
12. A t t a n a s i o C., M a r i t a t o L., P r i s c h e p a S. L. et al. // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77, № 5. P. 2081—2086.
13. Б у л а е в с к и й Л. Н., К у з и й В. В., С о б я н и н А. А. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25, вып. 7. С. 314—318.
14. Б у з д и н А. И., Б у л а е в с к и й Л. Н., П а н ю к о в С. В. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 35, вып. 4. С. 147—148.
15. Б у з д и н А. И., К у п р и я н о в М. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 53, вып. 6. С. 308—312.
16. Б у з д и н А. И., К у п р и я н о в М. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52, вып. 9. С. 1089—1091.
17. R a d o v i ć Z., L e d v i j M., D o b r o s a v l j e v i ć - G r u j i ć L. et al. // Phys. Rev. B. 1991. Vol. 44, № 2. P. 759—764.
18. B u z d i n A. I., K u p r i y a n o v M. Yu., V u j i c i ć B. // Physica C. 1991. Vol. 185—189, Part 3. P. 2025—2026.
19. Б у з д и н А. И., В у й и ч и ч Б., К у п р и я н о в М. Ю. // ЖЭТФ. 1992. Т. 101, вып. 1. С. 231—240.
20. B u z d i n A. // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62, № 17. P. 11377—11379.
21. J i a n g J. S., D a v i d o v i ć D., R e i c h D. H., C h i e n C. L. // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74, № 2. P. 314—317.
22. J i a n g J. S., D a v i d o v i ć D., R e i c h D. H., C h i e n C. L. // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54, № 9. P. 6119—6121.
23. M e r c a l d o L. V., A t t a n a s i o C., C o c c o r e s e C. et al. // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 53, № 21. P. 14040—14042.
24. A t t a n a s i o C., C o c c o r e s e C., M e r c a l d o L. V. et al. // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57, № 22. P. 14411—14415.
25. M ü h g e Th., G a r i f' y a n o v N. N., G o r y u n o v Yu. V. et al. // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77, № 9. P. 1857—1860.
26. M ü h g e Th., W e s t e r h o l t K., Z a b e l H. et al. // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 55, № 14. P. 8945—8954.
27. K o o r e v a a r P., S u z u k i Y., C o e h o o r n R., A a r t s J. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49, № 1. P. 441—449.
28. S t r u n k C., S ü r g e r s C., P a s c h e n U., v. L ö h n e y s e n H. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49, № 6. P. 4053—4063.
29. A a r t s J., G e e r s J. M. E., B r ü c k E. et al. // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56, № 5. P. 2779—2787.
30. V e r b a n c k J., P o t t e r C. D., M e t l u s h k o V. et al. // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57, № 10. P. 6029—6035.
31. B o u r g e o i s O., D y n e s R. C. // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 65, № 14. P. 144503 (1—5).
32. D e J o n g M. J. M., B e e n a k k e r C. W. J. // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 74, № 9. P. 1657—1660.
33. D e m l e r E. A., A r n o l d G. B., B e a s l y M. R. // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 55, № 22. P. 15174—15182.
34. K h u s a i n o v M. G., P r o s h i n Yu. N. // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56, № 22. P. R14283—R14286.
35. П р о ш и н Ю. Н., Х у с а и н о в М. Г. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66, вып. 8. С. 527—532.
36. П р о ш и н Ю. Н., Х у с а и н о в М. Г. // ЖЭТФ. 1998. Т. 113, вып. 5. С. 1708—1730.
37. I z y u m o v I. A., K h u s a i n o v M. G., P r o s h i n Yu. N. // ФНТ. 2006. Т. 32, вып. 8—9. С. 1065—1077.
38. T a g i r o v L. R. // Physica C. 1998. Vol. 307, № 1—2. P. 145—163.
39. V o d o p y a n o v B. P., T a g i r o v L. R., D u r u s o y H. Z., B e r e z h n o v A. V. // Physica C. 2001. Vol. 366, № 1. P. 31—42.
40. В о д о п ь я н о в Б. П., Т а г и р о в Л. Р. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, вып. 3. С. 153—158.
41. В о д о п ь я н о в Б. П., Т а г и р о в Л. Р. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 78, вып. 9. С. 1043—1047.
42. F o m i n o v Ya. V., C h t c h e l k a t c h e v N. M., G o l u b o v A. A. // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66, № 1. P. 014507 (1—13).
43. B u z d i n A., B a l a d i é I. // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 67, № 18. P. 184519 (1—6).
44. O b i Y., I k e b e M., K u b o T., F u j i m o r i H. // Physica C. 1999. Vol. 317—318. P. 149—153.
45. O g r i n F. Y., L e e S. L., H i l l i e r A. D. et al. // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62, № 9. P. 6021—6026.

Национальная академия наук Беларуси

46. V é l e z M., C y r i l l e M. C., K i m S. et al. // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 59. № 22. P. 14659—14662.
47. L a z a r L., W e s t e r h o l t K., Z a b e l H. et al. // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 61, № 5. P. 3711—3722.
48. G a r i f u l l i n I. A., T i k h o n o v D. A., G a r i f' y a n o v N. N. et al. // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66, № 2. P. 020505R (1—4).
49. O b i Y., F u j i s h i r o H., I k e b e M. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. Vol. 272—276. P. e1087—e1088.
50. O b i Y., I k e b e M., F u j i s h i r o H. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94, № 5. P. 057008 (1—4).
51. R u s a n o v A., B o o g a a r d R., H e s s e l b e r t h M. et al. // Physica C. 2002. Vol. 369, № 1—4. P. 300—303.
52. Р я з а н о в В. В., О б о з н о в В. А., П р о к о ф ь е в А. С., Д у б о н о с С. В. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, вып. 1. С. 43—47.
53. A n g r i s a n i A r m e n i o A., I a n n o n e G., C i r i l l o C. et al. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76, № 2. P. 024515 (1—6).
54. S i d o r e n k o A. S., Z d r a v k o v V. I., P r e p e l i t s a A. A. et al. // Ann. Phys. 2003. Vol. 12, № 1—2. P. 37—50.
55. C i r i l l o C., R u s a n o v A., B e l l C., A a r t s J. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75, № 17. P. 174510 (1—7).
56. C i r i l l o C., P r i s c h e p a S. L., S a l v a t o M. et al. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72, № 14. P. 144511 (1—7).
57. C i r i l l o C., P r i s c h e p a S. L., S a l v a t o M., A t t a n a s i o C. // J. Phys. Chem. Solids. 2006. Vol. 67. P. 412—415.
58. Z d r a v k o v V., S i d o r e n k o A., O b e r m e i e r G. et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97, № 5. P. 057004 (1—4).
59. S i d o r e n k o A. S., Z d r a v k o v V. I., K e h r l e J. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90, вып. 2. С. 149—152.
60. И з ю м о в Ю. А., П р о ш и н Ю. Н., Х у с а и н о в М. Г. // УФН. 2002. Т. 172, № 2. С. 113—154.
61. Р я з а н о в В. В. // УФН. 1999. Т. 169, № 8. С. 920—922.
62. Ф е й г е л ь м а н М. В., Р я з а н о в В. В., Т и м о ф е е в В. Б. // УФН. 2001. Т. 171, № 10. С. 1099—1115.
63. R y a z a n o v V. V., O b o z n o v V. A., R u s a n o v A. Yu. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 11. P. 2427—2430.
64. R y a z a n o v V. V., O b o z n o v V. A., V e r e t e n n i k o v A. V., R u s a n o v A. Yu. // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 65, № 2. P. 020501R (1—4).
65. R y a z a n o v V. V., O b o z n o v V. A., V e r e t e n n i k o v A. V. et al. // УФН. 2001. Т. 171 (приложение). С. 81.
66. Р я з а н о в В. В., О б о з н о в В. А., Б о л ь г и н о в В. В. и др. // УФН. 2004. Т. 174, № 7. С. 795—800.
67. O b o z n o v V. A., B o l' g i n o v V. V., F e o f a n o v A. K. et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96, № 19. P. 197003 (1—4).
68. K o n t o s T., A p r i l i M., L e s u e u r J. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89, № 13. P. 137007 (1—4).
69. B l u m Y., T s u k e r n i k A., K a r p o v s k i M., P a l e v s k i A. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89, № 18. P. 187004 (1—4).
70. S h e l u k h i n V., T s u k e r n i k A., K a r p o v s k i M. et al. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, № 17. P. 174506 (1—5).
71. R o b i n s o n J. W. A., P i a n o S., B u r n e l l G. et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97, № 17. P. 177003 (1—4).
72. R o b i n s o n J. W. A., P i a n o S., B u r n e l l G. et al. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76, № 9. P. 094522 (1—12).
73. К у п р и я н о в М. Ю., Л у к и ч е в В. Ф. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94, вып. 1. С. 139—146.
74. C o t t e t A., B e l z i g W. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72, № 18. P. 180503R (1—4).
75. F o m i n o v Ya. V., C h t c h e l k a t c h e v N. M., G o l u b o v A. A. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74, вып. 2. С. 101—104.
76. F a u r e M., B u z d i n A. I., G o l u b o v A. A., K u p r i y a n o v M. Yu. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, № 6. P. 064505 (1—12).

Национальная академия наук Беларуси

77. Moussy N., Courtois H., Pannetier B. // Europhys. Lett. 2001. Vol. 55, № 6. P. 861—867.
78. Kontos T., Aprili M., Lesueur J., Grison X. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 2. P. 304—307.
79. Zareyan M., Belzig W., Nazarov Yu. V. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 2. P. 308—311.
80. Crétinon L., Gupta A. K., Sellier H. et al. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72, № 2. P. 024511 (1—6).
81. Gusakova D. Yu., Golubov A. A., Kupriyanov M. Yu., Buzdin A. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 83, вып. 8. С. 385—389.
82. Krunavakarn B., Yoksan S. // Physica C. 2006. Vol. 440, № 1—2. P. 25—34.
83. Cirillo C., Bell C., Iannone G. et al. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, № 9. P. 094510 (1—5).
84. Silver A. H., Zimmerman J. E. // Phys. Rev. 1967. Vol. 157, № 2. P. 317—341.
85. Bauer A., Bentner J., Aprili M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92, № 21. P. 217001 (1—4).
86. Frolov S. M., Stoutimore M. J. A., Crane T. A. et al. // Nature Physics. 2007. Vol. 4. P. 32—36.
87. Tagirov L. R. // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83, № 10. P. 2058—2061.
88. Buzdin A. I., Vedyayev A. V., Ryzhanova N. V. // Europhys. Lett. 1999. Vol. 48, № 6. P. 686—691.
89. Gu J. Y., You C. -Y., Jiang J. S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 89, № 26. P. 267001 (1—4).
90. Potenza A., Marrows C. H. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71, № 18. P. 180503R (1—4).
91. Moraru I. C., Pratt Jr. W. P., Birge N. O. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96, № 3. P. 037004 (1—4).
92. Moraru I. C., Pratt Jr. W. P., Birge N. O. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74, № 22. P. 220507(R) (1—4).
93. Westerholt K., Sprungmann D., Zabel H. et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95, № 9. P. 097003 (1—4).
94. Novak G., Zabel H., Westerholt K. et al. // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 78, № 13. P. 134520 (1—12).
95. Rusanov A. Yu., Habraken S., Aarts J. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, № 6. P. 060505R (1—4).
96. Steiner R., Ziemann P. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74, № 9. P. 094504 (1—10).
97. Stamopoulos D., Manios E., Pissas M. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75, № 1. P. 014501 (1—9).
98. Singh A., Sürgers C., v. Löhneysen H. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75, № 2. P. 024513 (1—5).
99. Singh A., Sürgers C., Hoffmann R. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91, № 15. P. 152504 (1—3).
100. Kim D. H., Hwang T. J. // Physica C. 2007. Vol. 455, № 1—2. P. 58—62.
101. Leksin P. V., Salikhov R. I., Garifullin I. A. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90, вып. 1. С. 64—68.
102. Fominov Ya. V., Golubov A. A., Kupriyanov M. Yu. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, вып. 9. С. 609—614.
103. Rusanov A. Yu., Hesselberth M., Aarts J., Buzdin A. I. // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93, № 5. P. 057002 (1—4).
104. Proshin Yu. N., Zimin A., Fazleev N. G., Khusainov M. G. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, № 18. P. 184514 (1—12).
105. Bergeret F. S., Volkov A. F., Efetov K. B. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 14. P. 3140—3143.
106. Krivoruchko V. N., Koshina E. A. // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64, № 17. P. 172511 (1—4); 2002. Vol. 66, № 1. P. 014521 (1—6).
107. Golubov A. A., Kupriyanov M. Yu., Fominov Ya. V. // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75, вып. 4. С. 223—227.
108. Карминская Т. Ю., Куприянов М. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85, вып. 6. С. 343—348; 2007. Т. 86, вып. 1. С. 65—70.
109. Fauré M., Buzdin A. I., Gusakova D. // Physica C. 2007. Vol. 454, № 1—2. P. 61—69.

Национальная академия наук Беларуси

110. M a e n o Y., H a s h i m o t o H., Y o s h i d a K. et al. // Nature. 1994. Vol. 372, № 6506. P. 532—534.
111. M a c k e n z i e A. P., M a e n o Y. // Rev. Mod. Phys. 2003. Vol. 75, № 2. P. 657—712.
112. Б е р е з и н с к и й В. Л. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20, вып. 9. С. 628—631.
113. B e r g e r e t F. S., V o l k o v A. F., E f e t o v K. B. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 18. P. 4096—4099.
114. V o l k o v A. F., B e r g e r e t F. S., E f e t o v K. B. // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 90, № 11. P. 117006 (1—4).
115. B e r g e r e t F. S., V o l k o v A. F., E f e t o v K. B. // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64, № 13. P. 134506 (1—11); 2003. Vol. 68, № 6. P. 064513 (1—11).
116. K a d i g r o b o v A., S h e k h t e r R. I., J o n s o n M. // Europhysics Lett. 2001. Vol. 54, № 3. P. 394—400.
117. G i r o u d M., C o u r t o i s H., H a s s e l b a c h K. et al. // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 58, № 18. P. R11872—R11875.
118. P e t r a s h o v V. T., S o s n i n I. A., C o x I. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83, № 16. P. 3281—3284.
119. L ö f w a n d e r T., C h a m p e l T., E s c h r i g M. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75, № 1. P. 014512 (1—18).
120. L ö f w a n d e r T., C h a m p e l T., D u r s t J., E s c h r i g M. // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95, № 18. P. 187003 (1—4).
121. S c h o p o h l N., M a k i K. // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 52, № 1. P. 490—493.
122. E s c h r i g M., K o p u J., K o n s t a n d i n A. et al. // Advances in Solid State Physics. 2004. Vol. 44. P. 533—545, ed. by B. Kramer, Springer Verlag Heidelberg.
123. C h a m p e l T., E s c h r i g M. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71, № 22. P. 220506(R) (1—4); 2005. Vol. 72. № 5. P. 054523 (1—11).
124. V o l k o v A. F., F o m i n o v Ya. V., E f e t o v K. B. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72, № 18. P. 184504 (1—9).
125. F o m i n o v Ya. V., V o l k o v A. F., E f e t o v K. B. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75, № 10. P. 104509 (1—12).
126. V o l k o v A. F., A n i s h c h a n k a A., E f e t o v K. B. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73, № 10. P. 104412 (1—11).
127. V o l k o v A. F., E f e t o v K. B. // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 78, № 2. P. 024519 (1—11).
128. E s c h r i g M., K o p u J., C u e v a s J. C., S c h ö n G. // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 90, № 13. P. 137003 (1—4).
129. K e i z e r R. S., G o e n n e n w e i n S. T. B., K l a p w i j k T. M. et al. // Nature. 2006. Vol. 439, № 7078. P. 825—827.
130. E s c h r i g M., L ö f w a n d e r T., C h a m p e l Th. et al. // J. Low Temp. Phys. 2007. Vol. 147, № 3/4. P. 457—476.
131. E s c h r i g M., L ö f w a n d e r T. // Nature Physics. 2008. Vol. 4, № 2. P. 138—143.
132. A s a n o Y., T a n a k a Y., G o l u b o v A. A. // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 98, № 10. P. 107002 (1—4).
133. A s a n o Y., T a n a k a Y., G o l u b o v A. A. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76, № 22. P. 224525 (1—11).
134. G a l a k t i o n o v A. V., K a l e n k o v M. S., Z a i k i n A. D. // Phys. Rev. B. 2008. Vol. 77, № 9. P. 094520 (1—11).
135. B r a u d e V., N a z a r o v Yu. V. // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 98, № 7. P. 077003 (1—4).
136. S o s n i n I., C h o H., P e t r a s h o v V. T., V o l k o v A. F. // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96, № 15. P. 157002 (1—4).
137. R o b i n s o n J. W. A., W i t t J. D. S., B l a m i r e M. G. // Science. 2010. Vol. 329, № 5987. P. 59—61.
138. K h a s a w n e h M. A., P r a t t Jr. W. P., B i r g e N. O. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, № 2. P. 020506R (1—4).
139. K h a i r e T. S., P r a t t Jr. W. P., B i r g e N. O. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79, № 9. P. 094523 (1—11).
140. K h a i r e T. S., K h a s a w n e h M. A., P r a t t Jr. W. P., B i r g e N. O. // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 104, № 13. P. 137002 (1—4).
141. F l o k s t r a M., A a r t s J. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 80, № 14. P. 144513 (1—9).
142. T r u n k T., R e d j d a l M., K a k a y A. et al. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89, № 11. P. 7606—7608.

Национальная академия наук Беларуси

143. Русанов А. Ю., Голикова Т. Е., Егоров С. В. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87, вып. 3. С. 204—209.
144. Карминская Т. Ю., Куприянов М. Ю., Голубов А. А. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87, вып. 10. С. 657—663.
145. Houzet M., Buzdin A. I. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76, № 6. P. 060504R (1—4).
146. Bergeret F. S., Volkov A. F., Efetov K. B. // Appl. Phys. A. 2007. Vol. 89, № 3. P. 599—601.
147. Fominov Ya. V., Golubov A. A., Karminskaya T. Yu. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91, вып. 6. С. 329—333.
148. Feofanov A. K., Oboznov V. A., Bolginov V. V. et al. // Nature Physics. 2010. Vol. 6. P. 593—597.
149. Khabipov M. I., Balashov D. V., Maibaum F. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2010. Vol. 23, № 4. P. 045032 (1-6).
150. Muraniі A. P., Tari A., Coles B. R. // J. Phys. F: Met. Phys. 1974. Vol. 4, № 10. P. 1769—1781.
151. Tari A., Coles B. R. // J. Phys. F: Met. Phys. 1971. Vol. 1, № 6. P. L69—L71.
152. Nicklas M., Brando M., Knebel G. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 82, № 21. P. 4268—4271.
153. Yamada M., Tanda S. // Physica B. 2000. Vol. 281—282. P. 384—385.
154. Kidron A. // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 22, № 15. P. 774—776.
155. Iannone G., Zola D., Angrisani Armenio A. et al. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75, № 6. P. 064409 (1—6).
156. Zheng J. Q., Ketterson J. B., Falco C. M., Schuller I. K. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, № 4. P. 3150—3155.
157. Prischepa S. L., Cirillo C., Bell C. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 6. С. 431—435.
158. Prischepa S. L., Kushnir V. N., Cirillo C. et al. // Solid. State Phenomena. 2009. Vol. 152—153. P. 478—481.
159. Прищепа С. Л., Кушнир В. Н. // Весці НАН Беларусі. Сер фіз.-мат. навук. 2010. № 4. С. 108—111.
160. Linder J., Zareyan M., Sudbø A. // Phys. Rev. B. 2009. Vol. 79, № 6. P. 064514 (1—13).
161. Petrovykh D. Y., Altmann K. N., Höchst H. et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73, № 23. P. 3459—3461.
162. Prischepa S. L., Kushnir V. N., Ilyina E. A. et al. // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting-2007 / Eds. V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin. World Scientific, 2007. P. 39—46.
163. Кушнир В. Н. // Докл. НАН Беларуси. 2008. Т. 52, № 2. С. 39—42.

V. N. KUSHNIR, S. L. PRISCHEPA

SUPERCONDUCTOR-FERROMAGNET THIN FILM HETEROSTRUCTURES

Summary

The review is dedicated to the description of the properties of superconductor (*S*)—ferromagnet (*F*) thin film heterostructures. The history of the investigations of *S*/*F* heterostructures is described. It is shown that with the knowledge accumulation the transition from the pure science interest, caused by coexistence of two antagonistic phenomena, — superconductivity and ferromagnetism, to the development of practical nanoelectronic and spintronic devices took place. The conditions of nucleation of a new quantum ϖ-state in macroscopic *S*/*F* samples are analyzed in details. The experimental evidences of its existence are quoted. Large part of the review is dedicated to the description of influence of the magnetic inhomogeneities on the superconducting properties and proximity effect in *S*/*F* heterostructures. First experimental evidences of the existence of the long-range triplet component are discussed. The necessity of taking into account of possible influence of the variations of the exchange energy in thin films of ferromagnet alloys on the superconducting state nucleation in *S*/*F* heterostructures is pointed out.

Национальная академия наук Беларуси

ВЕСТНИК ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, № 1, 2011

на русском и белорусском языках

Редактор Т. П. Петрович

Компьютерная верстка О. А. Лобацкая

Подписано в печать 24.03.2011. Выход в свет 30.03.2011. Формат 70 × 100 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 9,9. Уч.-изд. л. 8,0. Тираж 161 экз. Заказ 63.

Цена номера: индивидуальная подписка — 17680 руб.; ведомственная подписка — 17740 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».
ЛИ № 02330/0494405 от 27.03.2009. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, Минск.

Национальная академия наук Беларуси