

УДК 533.9

**Новые тенденции в исследованиях по физике плазмы
и управляемому термоядерному синтезу в России
(обзор по материалам XLIII Международной конференции
по физике плазмы и УТС)**

И. А. Гришина, В. А. Иванов, Л. М. Коврижных

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 8 по 12 февраля 2016 года в городе Звенигороде Московской области. Проведен анализ развития и достижений главных направлений исследований в области физики плазмы как в России, так и за рубежом.

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Ключевые слова: физика плазмы, термоядерный синтез, конференция, результаты.

Введение

XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде с 8 по 12 февраля 2016 года.

Финансовую поддержку конференции оказали Российский фонд фундаментальных исследований, Федеральное агентство научных организаций, ЗАО Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН и Проектный центр ИТЭР. Организаторами прошедшей XLIII конференции являлись Научный совет по физике плазмы Российской академии наук, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Научный совет РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы», Объединенный институт высоких температур РАН, Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Центр лазерной технологии и материаловедения.

На конференции было представлено 344 научных доклада из 84 российских и 22 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество зарегистрированных авторов докладов составило более 1000 человек.

Список российских научных центров, представивших доклады (число докладов указано цифрами), следующий.

1. Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва — 55
2. Объединённый институт высоких температур РАН, Москва — 35
3. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва — 32
4. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва — 31
5. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск — 29
6. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Административный округ Троицк, Москва — 27
7. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва — 26
8. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург — 25
9. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва — 23
10. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва — 19
11. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург — 19

Гришина Ирина Анатольевна, старший научный сотрудник¹.
Иванов Вячеслав Алексеевич, заведующий отделом¹, доцент².
Коврижных Лев Михайлович, главный научный сотрудник¹.

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.
 E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 17 мая 2016 г.

© Гришина И. А., Иванов В. А., Коврижных Л. М., 2016

12. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск — 18
13. Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл. — 17
14. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии "РОСАТОМ" "Проектный центр ИТЭР", Москва — 15
15. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва — 14
16. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск — 12
17. Российский университет дружбы народов, Москва — 11
18. Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва — 7
19. Дагестанский государственный университет, Махачкала — 7
20. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород — 7
21. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва — 7
22. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалы, Москва — 6
23. Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород — 5
24. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров — 5
25. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург — 5
26. Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново — 4
27. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва — 4
28. Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН, Иваново — 4
29. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань — 4
30. МАТИ — Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского, Москва — 4
31. Московский технологический университет (МГТУ МИРЭА) — 4
32. Московский радиотехнический институт РАН, Москва — 4
33. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва — 3
34. Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва — 3
35. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, С.-Петербург — 3
36. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казань — 3
37. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина, Снежинск — 3
38. Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, Москва — 3
39. ЗАО "Спектрал-Тех", С.-Петербург — 2
40. Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург — 2
41. Институт космических исследований РАН, Москва — 2
42. Институт астрономии РАН, Москва — 2
43. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва — 2
44. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина, РАН, Москва — 2
45. АО "Красная Звезда", Москва — 2
46. Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань — 2
47. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ", С.-Петербург — 2
48. Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва — 2
49. Московский энергетический институт (технический университет), Москва — 2
50. Управляющая организация АО "Наука и инновации", РОСАТОМ, Москва — 2
51. Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники филиал ФНПЦ "ПО "Старт" им. М. В. Проценко", ГК "РОСАТОМ", г. Заречный Пензенской обл. — 2
52. ООО "Плазма-Конверсия", Саратов — 2
53. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва — 1
54. Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск — 1
55. Иркутский государственный университет, Иркутск — 1
56. Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва — 1
57. Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва — 1
58. Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука, Москва — 1
59. Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка — 1
60. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск — 1
61. Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск — 1
62. Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва — 1
63. Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск — 1
64. Казанский государственный энергетический университет, Казань — 1
65. ООО "Лазер Ай", Москва — 1
66. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва — 1
67. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, Саранск — 1
68. ОАО "Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита", предприятие госкорпорации "РОСАТОМ", Москва — 1
69. Научно-исследовательский институт приборов, г. Лыткарино, Московская область — 1
70. ОАО Научно-исследовательский институт точного машиностроения, Москва — 1

71. Научный центр волоконной оптики РАН, Москва — 1
72. ООО Производственная компания "Лаборатория импульсной техники", Москва — 1
73. Государственная корпорация по атомной энергии "РОСАТОМ", Москва — 1
74. ООО "Рок Флоу Динамикс" Москва — 1
75. ООО "СВД.Спарк", Административный округ Троицк, Москва — 1
76. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева, Самара — 1
77. ОАО Инновационный технологический центр "Система-Саров", Технопарк "Саров", Сатис, Дивеевский район, Нижегородской обл. — 1
78. АО "Техноэксан" Инновационная компания ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург — 1
79. Координационный центр "Управляемый Термоядерный Синтез – Международные Проекты", Москва — 1
80. Институт радиотехники и электроники РАН им. В. А. Котельникова, Фрязинский филиал, г. Фрязино — 1
81. ПАО "Федеральная сетевая компания единой энергетической системы", Москва — 1
82. Центральный научно-исследовательский институт машиностроения Роскосмоса, Королев — 1
83. ООО НТЦ "ЭКОН", Королев, Московская область — 1
84. Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, Москва — 1

Участниками конференции, представившими доклады из стран дальнего и ближнего зарубежья, являются следующие научные организации.

1. Princeton University, Princeton, USA — 3
2. ITER Organization, St. Paul lez Durance, France — 3
3. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь — 3
4. Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан — 2
5. Cornell University, Ithaca, New York, USA — 2
6. Сухумский физико-технический институт, Сухум, Абхазия — 2
7. Aalto University, EURATOM-TEKES, Espoo, Finland — 1
8. Centre de Recherché, Plasma – Matériaux – Nanostructures, Grenoble, France — 1
9. ESTLA Ltd., Tartu, Estonia — 1
10. GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany — 1
11. Goethe Universität, Frankfurt am Main, Germany — 1
12. Institut national de la recherche scientifique, Énergie, Matériaux et Télécommunications, Varennes, Québec, Canada — 1
13. FOM Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, Association EURATOM-FOM, Nieuwegein, Netherlands — 1
14. Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, Kyoto, Japan — 1
15. ENEA and Laboratorio Laerte, Bologna, Italy — 1

16. Laboratory of Plasma Physics, Ecole Polytechnique, University Paris-Sud, Paris, France — 1
17. Laboratory for Plasma Physics – ERM/KMS, Association EURATOM – BELGIAN STATE, Brussels, Belgium — 1
18. Tri Alpha Energy, Inc., Foothill Ranch, Lake Forest, California, USA — 1
19. University of California, San Diego, USA — 1
20. Université de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France — 1
21. University of Saskatchewan, Saskatchewan, Canada — 1
22. Республиканское унитарное предприятие "Научно-практический центр гигиены", Минск, Беларусь — 1

На конференции были заслушаны доклады по пяти важнейшим направлениям физики плазмы:

1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
2. Инерциальный термоядерный синтез.
3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.
4. Физические основы плазменных и лучевых технологий.
5. Проект ИТЭР: шаг в энергетику будущего.

Пленарные заседания и обзорные доклады

На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 16 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 81 устных и 247 стендовых докладов.

Обзорные доклады, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции, по существу подводили итоги работ, выполненных за последний год в области физики высокотемпературной плазмы, управляемого термоядерного синтеза, низкотемпературной плазмы, и прикладных работ по плазменным и лучевым технологиям. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы проблемам.

Открыл конференцию доклад **Дж. Онгена** «Новые результаты термоядерных исследований в Европе и планы на будущее» (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). Участники конференции были ознакомлены с результатами экспериментальных компаний 2015 года на токамаке JET, посвященных дальнейшему моделированию и оптимизации сценариев, аналогичных сценариям строящейся установки по международной про-

грамме ИТЭР, для получения плазмы при дополнительном нагреве до 40 МВт и при высоких значениях электрического тока в плазме $I_p \geq 3,5$ МА и тороидальных магнитных полях $B_t \geq 3,85$ Тл. Особое внимание было уделено контролю тепловыделения в диверторной плазме. Кроме того, в докладе говорилось об успешном вводе в эксплуатацию стелларатора W7-X. Первая плазма на нем была получена 10 декабря 2015 года.

Большой интерес вызвал доклад **А. Ю. Стариковского** (Университет Принстон, США) «*Развитие импульсных нано- и пикосекундных разрядов в жидкостях*». Рассматривались возможные механизмы распространения разряда в жидкостях, которые различны для разрядов разной длительности. Отмечалось, что диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика оказывает сильное влияние на развитие в нем наносекундного разряд. Было продемонстрировано значительное снижение порога пробоя для разряда в воде по сравнению с разрядом в гексане и спирте, что может быть объяснено образованием микро-разрывов в сплошной среде в процессе электрострикционного сжатия и последующего разрежения в жидкостях с высокими величинами диэлектрической проницаемости. В двух других случаях — для «длинных» микросекундных и «коротких» пикосекундных импульсов — диэлектрическая проницаемость жидкости играет лишь незначительную роль в процессе формирования разряда.

В обзорном докладе **А. Волландера** (Организация ИТЭР, Франция) «*Статус системы контроля ИТЭР*» были представлены данные о принципах организации и структуре контрольной системы крупнейшего международного токамака ИТЭР, строящегося во Франции. Система управления ИТЭР призвана обеспечить интегрированную и автоматизированную работу всех систем установки, обеспечивая безопасность работы, включая ядерную безопасность. Поскольку в работе над системой управления ИТЭР принимают участие семь стран-участников проекта (США, Россия, Европейский союз, Китай, Индия, Республика Корея, Япония), то первостепенную роль играет установление стандартов в разработке программного обеспечения и аппаратных средств. Подчеркивалась ключевая роль интеграции разработок отдельных стран в общую систему контроля ИТЭР.

В докладе «*ИТЭР. Выбор приоритетов и начало сооружения*», представленном **Л. Н. Химченко** и **А. В. Красильниковым** (Проектный центр ИТЭР), был представлен обзор текущего состояния работ по проекту ИТЭР. Отмечалось, что полным ходом идет сооружение инфраструктуры на площадке ИТЭР в г. Кадараш (Франция).

Изготовление систем ИТЭР в странах-участницах проекта из квалификационной фазы переходят в производственную фазу. Составлен детальный план сборки основной установки и определено реальное ресурсное обеспечение этого процесса. Проверяется готовность дорог и маршрутов перевозки систем на площадку сооружения установки. Создан сквозной технический график работ, вплоть до инициирования D—T-реакции (ядерный синтез дейтерий-тритиевой смеси) в установке, контроль изменений в графике и технических системах производится одновременно одним органом управления ИТЭР.

Проблематика доклада **И. М. Подгорного** и **А. И. Подгорного** (ИНАСАН, ФИАН) отражена в названии доклада «*Солнечные космические лучи — механизм ускорения и распространение*». Среди многообразия явлений, сопровождающих солнечную вспышку, генерация релятивистских протонов оставалась наиболее загадочной. Измерения на космических аппаратах GOES показали, что длительность генерации ускоренных протонов совпадает с длительностью вспышки и редко превосходит 20—30 мин, а длительность потока протонов на орбите Земли составляет трое суток. Трое суток — это типичное время распространения солнечного ветра со скоростью $\sim 5 \times 10^7$ см/с от Солнца к Земле. Численное МГД-моделирование показало, что ускорение протонов происходит полем Лоренца вдоль особой линии токового слоя, ответственного за вспышку.

Проблеме выявления в лабораторных условиях механизмов, отвечающих за коллимацию астрофизических джетов (плазменных струй), был посвящен доклад **В. И. Крауза** (НИЦ Курчатовский институт) «*Лабораторное моделирование астрофизических джетов*». «Лабораторная астрофизика», при соблюдении определенных законов подобия, позволяет получить ценную информацию о фундаментальных процессах во Вселенной, зачастую просто недоступных для прямого исследования в естественных условиях. В лабораторных условиях удастся получить джеты с безразмерными параметрами, аналогичным наблюдаемым в «молодых» звездных объектах. В НИЦ "Курчатовский институт" начат цикл работ по моделированию распространения джетов в межзвездной среде. Базовые эксперименты выполняются на установке ПФ-3. Получены первые результаты по определению формы и структуры плазменного потока, плотности и температуры как самого потока плазмы, так и фоновой плазмы, а также распределения захваченных магнитных полей.

В обзоре **Е. З. Гусакова** (ФТИ РАН) «*Изотопный эффект в турбулентном переносе в токамаке. (Наблюдение и глобальное гирокинетиче-*

ское моделирование)» были представлены результаты сравнительного исследования изотопного эффекта в многомасштабном турбулентном переносе, выполненного как экспериментально с помощью локальных диагностик турбулентности в сходных водородных и дейтериевых омических разрядах токамака ФТ-2, так и теоретически с помощью глобального giroкинетического моделирования этих разрядов. С помощью обоих подходов показано, что в дейтериевой плазме, в градиентной зоне разряда в токамаке, амплитуда, длина волны и корреляционная длина геодезической акустической моды (ГАМ) существенно больше, чем в водородной плазме, что приводит к большей модуляции уровня турбулентности. Полученные экспериментальные и расчетные результаты можно использовать для объяснения изотопного эффекта в процессах переноса в экспериментах на токамаках DIII-D, TCV и T-10, где ГАМ наблюдается в широкой области по радиусам плазменного шнура.

В последнее время были получены многочисленные экспериментальные свидетельства наличия аномальных эффектов при распространении СВЧ-волн при электронном циклотронном резонансом (ЭЦР) нагреве плазмы в установках TEXTOR, TCV, TJ-II, ASDEX-U, LHD и FTU. В обзорном докладе **А. Ю. Попова** (ФТИ РАН) «Аномальное поглощение и рассеяние при ЭЦР-нагреве плазмы на второй гармонике резонанса, связанные с двухплазмонным распадом» была описана физическая модель, развивающая теоретические представления о процессах рассеяния в плазме токамака с учетом немонотонности профиля плотности плазмы, вызванной особенностями удержания плазмы в магнитном острове или “electron pump-out” эффектом. Предложенный механизм позволяет воспроизвести в деталях спектр аномально рассеянных волн и оценить мощность принимаемых сигналов, предсказывает для типичных условий токамака TEXTOR потерю 25 % мощности накачки в электронном канале, а также может объяснить нагрев ионов на токамаке TCV.

В докладе **И. А. Коссого** (ИОФ РАН) «Физические основы и актуальные приложения новой формы мощного микроволнового (СВЧ) разряда в газах высокого давления» был дан обзор работ, экспериментальных и теоретических, проведенных в ИОФ РАН и ИПФ РАН, в которых впервые наблюдалась и исследовалась новая форма микроволнового разряда, получившая название самоподдерживающегося несамостоятельного разряда (СНС-разряда). Разряды такого типа формируются в газах высокого давления при сильной подпороговости по электрическому полю в СВЧ-волне по отношению к возбуждению самостоятельного (са-

моподдерживающегося) СВЧ-разряда в свободном пространстве. Была приведена физическая модель явления в условиях, когда сам факт формирования газоразрядной плазмы кажется парадоксальным. Представлены результаты экспериментов, проведенных как с относительно маломощными (< 1 кВт) источниками СВЧ-излучения, так и с мощными гиротронами (≤ 1 МВт), демонстрирующие безусловную привлекательность СНС-разряда для актуальных проблем современной техники.

Доклад большого коллектива авторов, представляющих ИОФ РАН, ИФХЭ РАН, ИМаш РАН и ООО «СВД. Спарк», и представленный **К. Ф. Сергеевым**, был направлен на решение научно-технической проблемы упрочнения режущих инструментов поликристаллическим алмазным покрытием. Название доклада — «Газофазный метод упрочнения режущих инструментов поликристаллическим алмазным покрытием». Обсуждались физические основы модернизации и применения метода газофазного синтеза поликристаллических алмазных покрытий в плазме СВЧ-реакторов для упрочнения рабочей поверхности твердосплавных режущих инструментов с целью увеличения их износостойкости и чистоты обработки материалов. Вопрос жизнестойкости инструментов актуален, прежде всего, в нефтегазодобывающей отрасли, где для бурения скальных пород используются вращательные долота, оснащенные алмазными PDC (Polycrystalline Diamond Cutter) фрезами, которые в настоящее время в России не производятся.

В обзорном докладе **М. М. Цвентуха** «Нестационарные процессы во взрывоэмиссионных ячейках катодного пятна вакуумного разряда» (ФИАН) были рассмотрены некоторые аспекты процессов генерации плазмы и протекания тока, происходящих во взрывоэмиссионных ячейках катодного пятна вакуумного электрического разряда. Указывалось на сходство процессов, происходящих во взрывоэмиссионных ячейках катодного пятна вакуумной дуги и самостоятельных электрических разрядов в вакууме, возникающих при взаимодействии горячей плазмы токамаков и стеллараторов с первой стенкой этих установок. При этом применение разрабатываемых защитных покрытий первой стенки термоядерных установок, например, таких как жидкометаллические пленки лития или слои нановолокон вольфрама W-fuzz (вольфрамовый пух), только облегчает возбуждение и горение электрических дуговых разрядов на стенках. Особенно отмечалось, что след от катодного пятна дуги, даже в случае горения на слоях вольфрамовых нановолокон, по структуре полностью идентичен следу обычных вакуумных дуг на пленках, и представляет собой ветвящуюся траекторию микронной ширины.

Был также заслушан обзорный доклад **В. С. Филинова** (ОИВТ РАН) «*Моделирование термодинамических и транспортных свойств кварк-глюонной плазмы*». В рамках квазичастичной модели представлены результаты математического моделирования термодинамических и транспортных свойств сильно неидеальной кварк-глюонной плазмы. Обоснованием модели кварк-глюонной плазмы является серия опубликованных в литературе работ по квантовой хромодинамике, в которой имеются указания на то, что основные свойства неабелевой плазмы могут быть описаны в рамках квазичастичного приближения. На основе этих представлений сформулирована квантовая релятивистская модель неидеальной кварк-глюонной плазмы с «цветным» кулоновским взаимодействием между квазичастицами, соответствующими «одетым» кваркам, антикваркам и глюонам.

Обзор активно развивающихся во многих лабораториях мира исследований, направленных на создание ускорителей релятивистских электронов нового поколения был дан в докладе **Н. Е. Андреева** (ОИВТ РАН) «*Новые методы ускорения электронов до сверхвысоких энергий*». Было отмечено, что ускорение электронов до сверхвысоких энергий тераэлектронвольтового диапазона и создание компактных источников релятивистских электронов и жесткого рентгеновского излучения требует разработки новых методов ускорения электронов, причем с темпами ускорения, намного превышающими достижимые в традиционных радиочастотных ускорителях. Среди таких методов наиболее активно развиваются подходы с использованием кильватерных полей, генерируемых в плазме интенсивными пучками заряженных частиц (электронов или ионов) и релятивистски-интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами. Также обсуждались недавно полученные в ОИВТ РАН результаты теоретических исследований и компьютерного моделирования, в которых изучались различные механизмы генерации потоков высокоэнергетических электронов и ускорения коротких сгустков электронов мультигигаэлектронвольтового диапазона с малым разбросом по энергии и эмиттансом, необходимых для многих приложений.

С. В. Буланов (ИОФ РАН, Kansai Photon Science Institute, Japan) сделал доклад на тему «*Ускорение электронов и ионов плазмы в релятивистски сильных лазерных полях*». Был дан обзор результатов исследований ускорения заряженных частиц в процессе взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой и различными мишенями. Рассмотрен основной механизм ускорения электронов, который обусловлен сильным регулярным электрическим полем в кильватерной

плазменной волне, возбуждаемой мощным импульсом лазера в плазме относительно низкой плотности. Лазерное ускорение ионов мотивируется важными приложениями: поджигание мишеней в рамках концепции инерциального УТС, необходимостью создания компактного ускорителя ионов для адронной терапии онкологических заболеваний и др. Наиболее эффективный механизм ускорения ионов — радиационное давление лазерного излучения на плазму. Представлены результаты экспериментов по ускорению заряженных частиц, полученных в ведущих научных лабораториях мира.

Выбор материалов, обращенных к плазме в камере термоядерной системы, например, реакторатомака или термоядерного источника нейтронов, на сегодняшний день выходит в ряд наиболее острых физико-технических проблем. Эта тема обсуждалась в докладе **Б. И. Хрипунова с соавторами** (НИЦ Курчатовский институт, НИИЯФ МГУ) «*Исследование воздействия плазмы на радиационно-поврежденные термоядерные материалы*». По мнению авторов, решение этой проблемы необходимо искать как в ослаблении влияния термоядерной плазмы на стенку, так и в создании материалов, позволяющих выдерживать воздействие плазмы и нейтронного излучения в течение всего срока службы реактора. В НИЦ «Курчатовский институт» ведется комплексное экспериментальное исследование эффектов, связанных с воздействием плазмы на радиационно-поврежденные материалы. Радиационные повреждения высокого уровня получаются с помощью ионов, ускоренных до высоких энергий МэВ-ного диапазона. Изучаются углеграфитовые материалы, вольфрам, включая кандидатный материал PLANSEE для установки ИТЭР. Изучаются характеристики эрозии материалов в плазме и накопление трития в материалах первой стенки термоядерных установок.

Большой интерес вызвал доклад **С. В. Щепетова** (ИОФ РАН) «*Аналитические и трехмерные расчеты МГД-процессов в стеллараторах*». В нем были представлены аналитические и численные расчеты пилинг-мод в Мерсье-устойчивой/неустойчивой плазме для систем с «магнитным бугром». Аналитически и численными методами показано, что в Мерсье-устойчивой замагниченной плазме с конечным градиентом давления внутренние пилинг-моды устойчивы. Внешние моды (т. е. моды, не имеющие рациональной магнитной поверхности внутри плазмы) могут быть неустойчивы. Показано, что внешние пилинг-моды имеют порог по величине градиента давления плазмы, ниже которого они устойчивы. Продемонстрировано, что аналитические и численные результаты

находятся в хорошем соответствии с имеющимися экспериментальными данными. Также был дан краткий обзор современного состояния трехмерных нелинейных расчетов в рамках магнитогидродинамических моделей высокотемпературной замагниченной плазмы.

Секционные доклады

Секция «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы»

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы», работавшей под руководством А. И. Мещерякова, было представлено 67 докладов: 19 на устных и 48 на стендовых заседаниях. Представленные работы выполнены сотрудниками 22 российских научных центров, а 5 докладов выполнены совместно с учеными научных центров США, Франции, Финляндии, Эстонии и Беларуси.

Доклады, представленные на секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы», были посвящены проблемам создания управляемого термоядерного реактора, гибридного реактора, сочетающего ядерные и термоядерные технологии, а также термоядерного источника нейтронов на основе установок с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы, а именно: токамаков, стеллараторов и открытых ловушек.

Термоядерный источник нейтронов (ТИН) предполагается использовать как для создания гибридного реактора, так и для дожигания отходов атомных реакторов. В первом случае ТИН окружен бланкетом, состоящим из атомов, делящихся под воздействием потока термоядерных нейтронов, что позволяет увеличить энергетическую эффективность термоядерного реактора. Для ТИН не ставится задача зажигания термоядерной плазмы, а достаточно получить нейтронный выход, сопоставимый с вкладываемой мощностью дополнительного нагрева дейтерий-тритиевой плазмы. В сравнении с чистым термоядерным реактором без делящихся материалов, необходимая мощность термоядерной реакции может быть до 100 раз меньше в связи с тем, что основное энерговыделение происходит в подкритическом бланкете, за счет реакций деления тяжелых ядер урана, что существенно снижает требования к параметрам плазмы и материалам токамака.

Современные токамаки (TFTR, JET, JT-60U) успешно продемонстрировали возможность их использования в качестве импульсных (длительностью около 1 с) источников термоядерных нейтронов с пиковой мощностью 10—20 МВт. Но для создания стационарного ТИН на основе токамака

требуется решить две основные задачи: поддержание в токамаке стационарного тока на уровне нескольких мегаампер и поддержание внутри и вне границы плазменного шнура токамака стационарных условий удержания горячей плазмы.

На решение важной задачи осуществления замкнутой циркуляции дейтерий-тритиевого горючего в реакторе в процессе рабочего цикла, а также существенного снижения тепловых нагрузок на диверторные пластины нацелены работы по применению жидкого лития в качестве материала первой стенки.

В настоящее время на токамаке T-11M (ТРИНИТИ) исследуется модель прототипа замкнутого контура циркуляции лития для защиты стенки камеры токамака, которая впоследствии может быть предложена для стационарного термоядерного источника нейтронов на основе токамака.

На токамаке T-10 (НИЦ «Курчатовский институт») также проводятся эксперименты с литиевыми диафрагмами. Предполагается, что применение вольфрама в качестве обращенного к плазме материала первой стенки позволит исключить поступление углерода в плазму, а охлаждение периферии плазмы за счет переизлучения на атомах лития приведет к снижению потока энергии на вольфрамовые лимитеры.

В последнее время в экспериментах по нагреву и удержанию плазмы, проводимых на открытых ловушках, таких как газодинамическая ловушка (ГДЛ) и установка с многопробочной магнитной системой ГОЛ-3, продемонстрированы значительные успехи. Например, в экспериментах в ИЯФ СО РАН на установке ГДЛ, которая является также физическим прототипом термоядерного нейтронного источника, продемонстрирован существенный прогресс в решении задач ограничения продольных потерь энергии плазмы. Также в ней был реализован режим удержания горячей плазмы с высоким значением относительного давления β в рамках осесимметричной конфигурации магнитного поля. За последние два года на установке ГДЛ были получены несколько принципиально важных результатов: температура электронов плазмы достигла величины $T_e = 0,9$ кэВ, а давление плазмы относительно давления магнитного поля превысило 0,6. Эти достижения позволяют уже сегодня говорить о возможности проектирования и последующего строительства термоядерного источника нейтронов с параметрами нейтронного потока, подходящими для испытания материалов. В перспективе можно рассматривать открытую ловушку типа ГДЛ как основу для применения в ядерной энергетике в качестве дожигателя долгоживущих радиоактивных отходов, а также в качестве драйвера в подкритической энергетической

установке для наработки топлива для ядерных реакторов, и даже в качестве чисто термоядерной энергетической установки.

Работа секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» способствовала решению проблемы создания термоядерных источников нейтронов как на основе токамаков, так и на основе открытых ловушек, а также проблемы создания стационарного источника нейтронов для ядерного топливного цикла ТИН. В целом, работа секции была успешной и продемонстрировала соответствие уровня работ, проводимых в российских научных центрах в данной области исследований, мировому уровню. Возросло по сравнению с прошлым годом число молодых ученых, принимавших участие в работе секции.

Секция «Инерциальный термоядерный синтез»

На секции "Инерциальный термоядерный синтез" (ИТС), работавшей под председательством Степанова Р. В., было представлено 15 устных и 41 стендовый доклад. Результаты 5 докладов получены при международном сотрудничестве с научными центрами США, Германии и других стран. По представленным на секции докладом, можно выделить несколько направлений исследований по ИТС и смежным проблемам, на которых сосредоточены усилия российских научных коллективов, задействованных в данной сфере. Среди работ, проводимых на мощных электроразрядных установках, прежде всего, следует отметить важные результаты, получаемые коллективом ТРИНИТИ на установке "Ангара-5-1" при всесторонней расчетно-теоретической поддержке ИПМ РАН. Один из развитых в ИПМ комплексов (MARPLE3D) постепенно становится многофункциональной вычислительной платформой, в будущем способной моделировать не только физические процессы в исследуемых объектах, но и отклик экспериментальной диагностической аппаратуры. Это сделает возможным проведение полноценных виртуальных экспериментов, удешевляющих и упрощающих исследования на промежуточной стадии.

Разработанная в ФИАН несколько лет назад концепция гибридного X-пинча позволила развить на основе его уникальных характеристик оригинальные спектроскопические и радиографические диагностические методики рентгеновского диапазона. Как показали доклады, представленные этой группой, появилась возможность расширения генерируемого рентгеновского излучения в более коротковолновую область длин волн для применения в методе проекционной радиографии.

Важное место среди работ по лазерно-плазменной тематике занимают исследования, на-

правленные на создание источников пучков заряженных частиц и вторичного импульсного излучения (рентгеновского и нейтронного) при помощи интенсивных ультракоротких лазерных импульсов. Такие источники имеют очень широкий спектр возможных актуальных приложений: от физики ИТС до биологических исследований и медицинских терапевтических методик. К сожалению, имеющиеся в России установки, позволяющие проводить эксперименты по данному направлению, немногочисленны (например, Сокол-II в РФЯЦ-ВНИИТФ), и их возможности невелики по сравнению с возможностями установок мировых лидеров.

Технологическое направление было представлено результатами, полученными в ходе реализации исследовательских программ ФИАН. В разных областях ИТС (в том числе — для задач лазерно-плазменного ускорения частиц) востребованы различные малоплотные пористые мишени высокого качества, технологии, производства которых успешно разрабатываются в этом институте. Другой аспект деятельности ФИАН связан с созданием и совершенствованием технологии массового производства бесподвесных криогенных термоядерных мишеней как для исследовательских нужд, так и для будущих реакторов ИТС.

Важным представляются сообщения о модернизации установки "Луч" и о совместной разработке для нее сотрудниками ИЛФИ и МИФИ лазерного диагностического комплекса VISAR, масштабируемого также на установки мегаджоульного уровня энергии. Эта методика позволяет с высокой точностью измерять в широком диапазоне значений скорости объектов. Создание собственного диагностического комплекса подобного уровня является значимым достижением, особенно если иметь в виду строительство национальной лазерной установки мегаджоульного уровня энергии.

В целом, работа секции "Инерциальный термоядерный синтез" была успешной и прошла на высоком научном уровне. Практически все представленные доклады относились к поисковым направлениям, поэтому говорить о полном решении тех или иных комплексных проблем преждевременно. Особенно отчетливо это проявляется в общей картине работ лазерно-плазменной направленности. Действительно: налаженная кооперация и развитая экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному прогрессу исследований, проводимых на электроразрядных установках. Как уже неоднократно отмечалось, фактическое отсутствие лазерных систем промежуточных и высоких классов негативно сказывается на возможностях российских научных групп: ве-

душие отечественные специалисты участвуют в экспериментальных программах тех стран, где есть соответствующие установки. В этом контексте вызывает определенный оптимизм известие, прозвучавшее в одном из докладов, о принятии решения по строительству в НИЯУ МИФИ мощной лазерной системы ЭЛЬФ-МИФИ, структура которой в целом будет повторять установку "Луч" и использовать ее запасные комплектующие. Вместе с тем необходимо отметить, что еще в 2011 г. начались переговоры между Россией и Европейским Союзом о создании в Нижнем Новгороде на базе ИПФ РАН международного исследовательского комплекса XCELS, который был включен в число шести научных мегапроектов, отобранных комиссией при правительстве РФ, и должен был стать крупнейшим комплексом в рамках европейского проекта ELI. Несмотря на общее одобрение сторон, переговоры затягиваются, и на официальном сайте ELI указано, что место строительства еще не выбрано, тогда как для остальных трех комплексов решения уже приняты: Чехия, Венгрия и Румыния.

Секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме»

На XLIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС в рамках Научного совета РАН по проблеме «Физика низкотемпературной плазмы» работала секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме» (председатель секции В. С. Воробьев). Было заслушано 24 устных доклада и 72 стендовых сообщения. Восемь работ выполнены в сотрудничестве с научными центрами США, Канады, Франции, Беларуси и Казахстана.

Устные доклады подытоживали исследования в следующих основных направлениях:

- 1) термодинамические и транспортные свойства неидеальной плазмы;
- 2) элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы;
- 3) различные применения низкотемпературной плазмы;
- 4) плазма, возникающая в импульсных процессах.

По этим же направлениям были представлены и стендовые доклады. Также было представлено ряд докладов, связанных с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России. Необходимо выделить новое направление, которое

применимо к условиям, когда низкотемпературная плазма превращается в т. н. «теплую плотную материю» (warm dense matter). Это направление интенсивно развивается в ведущих мировых исследовательских центрах. Исследования российских ученых также играют существенную роль в развитии этого направления. Так, значительный интерес вызвал доклад **А. Л. Хомкина и А. С. Шумихина** (ОИВТ РАН) «*Диссоциативный фазовый переход и металлизация в молекулярных газах*». В основу модели положено предположение о том, что главной причиной фазового перехода является появление в плотной низкотемпературной плазме атомарного газа (в газовой окрестности критической точки) особого вида притяжения между атомами металла, обусловленного возникновением зоны проводимости и появлением электронов проводимости. В докладе **В. С. Воробьева и Е. М. Апфельбаума** (ОИВТ РАН) «*Симметризация бинодальной и определение критических точек некоторых материалов на основе низкотемпературных измерений*» рассматривалась плотная плазма металлов и обсуждалась возможность появления новых фазовых переходов при высоких температурах и давлениях. Исследования «теплой плотной материи» являются перспективным развивающимся направлением исследований в России в области низкотемпературной плазмы.

Другое интересное направление связано с изучением свойств низкотемпературной плазмы при пробое газов и конденсированных сред. Этот вопрос был рассмотрен в докладах **К. Н. Ульянова** (ГНЦ РФ ФГУП ВЭИ) «*Лидерный пробой при высоких напряжениях*» и **Н. Н. Дятко с соавторами** (СПбГУ, ТРИНИТИ) «*Экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование радиальных профилей концентрации метастабильных атомов в тлеющем разряде постоянного тока в неоне*». Представленные материалы представляют новый вклад в физику низкотемпературной плазмы и соответствуют мировому уровню исследований в данной области, а также открывают перспективу их практического приложения.

На двух заседаниях стендовой секции было представлено 72 доклада. Значительная часть из них была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. Третья группа связана с исследованиями специфических форм разрядов в низкотемпературной плазме.

В целом, работа секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» была успешной, прошла на высоком научном уровне и показала, что ряд новых направлений, например, таких как «warm dense matter и изучение свойств низкотемпературной плазмы при пробое газов и конденса-

рованных сред», успешно развиваются в России и не уступают мировому уровню.

Секция «Физические основы плазменных и лучевых технологий»

На секции «Физические основы плазменных и лучевых технологий» (председатель секции А. Ф. Александров) было представлено 15 устных и 52 стендовых доклада из институтов РАН, вузов и других ведущих научных центров России. Две работы выполнены совместно с научными центрами Италии и Франции.

Можно разделить доклады по следующим научным направлениям:

а) плазменные устройства, в том числе разряды, пучки и пучково-плазменные разряды, устройства физической электроники, их свойства и диагностика;

б) воздействие плазмы на вещество, плазмохимические процессы;

в) вопросы плазменной аэродинамики, стимулированные разрядами процессы горения, плазменные процессы в воздушной атмосфере;

г) компьютерная физика плазмы и плазмподобных сред.

Ряд докладов включали вопросы разных направлений.

Конференция способствовала решению проблем создания и модернизации высокоэнергетических плазменных устройств, таких как мощные плазмотроны, генераторы терагерцового излучения, источники мощного СВЧ-излучения. Представленные доклады показывают, что мероприятие в существенной степени влияет на развитие плазменных методов создания новых перспективных веществ, модификации поверхности и формы образцов как плазмохимическими, так и плазмодинамическими методами.

Обмен мнениями и информацией по результатам в области плазменной аэродинамики и плазмой стимулированного горения способствует ускоренному выходу исследований в данной области на стадию практических приложений. Уровень исследований в этих областях не уступает мировому. Заметная часть работ выполнена в кооперации с зарубежными коллективами. Положительным фактом является также значительное число работ с участием молодых ученых, аспирантов и студентов старших курсов университетов России.

Секция «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего»

На ставшую уже традиционной секцию «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего» (предсе-

датель секции А. В. Красильников) в этом году было представлено 39 докладов, из них 9 были доложены на устном заседании, 30 — на стендовом.

Доклады устного заседания были посвящены состоянию работ по созданию систем установки ИТЭР. Работа **Р. С. Афанасенко** была посвящена исследованию влияния положения российского диагностического оборудования по спектроскопии водородных линий на полный поток нейтронов в экваториальном порту № 11 установки ИТЭР в герметизирующей плите, отделяющей внутреннее пространство порта от межпортового пространства. Доклад **И. И. Поддубного** был посвящен результатам расчетного и экспериментального обоснования конструкций соединителей модулей бланкета. Проведены оценки прочности конструкций соединителей модулей бланкета в соответствии с нормами прочности ИТЭР для внутрикамерных компонентов. В докладе **Г. С. Курскиева** представлено состояние работ по созданию диагностики томсоновского рассеяния (ДТР) плазмы в диверторе установки ИТЭР. Рассмотрены следующие вопросы: оптическая схема системы сбора рассеянного излучения и ввода лазерного излучения в плазму; конструкция внутривакуумных компонент ДТР; принципы построения и создание опытных образцов диагностической аппаратуры; и проведение серии испытаний опытных образцов диагностической аппаратуры на токамаке Глобус-М. В докладе **И. Б. Семенова** была рассмотрена концепция создания системы управления плазмой в установке ИТЭР в режиме реального времени. Система управления установкой включает в себя систему общего управления, систему блокировок и защит, систему ядерной и промышленной безопасности и систему управления плазмой. **А. С. Наволоцкий** рассказал о возможности измерения электронной температуры плазмы в установке ИТЭР по потокам атомов с энергией выше энергии инжекции диагностического пучка. В докладе **Ю. С. Суляева** был представлен обзор результатов проектных работ по оборудованию для интеграции диагностических систем экваториального порта № 11. Представлены результаты инженерных и нейтронных расчетов вакуумной части порта, обсуждались пути оптимизации конструкции защитных модулей для снижения механических и нейтронных нагрузок. Доклады сотрудников организации ИТЭР **Дж. Делонга** и **Л. Абади** посвящены статусу, плану развития и вопросам интеграции системы CODAC.

Работа секции была успешной. Она показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку проекта ИТЭР в рамках ответственности по поставкам Российской Федерации.

Заключение

В целом следует отметить, что XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2016 года стала важным событием, оказавшим влияние на развитие научных исследований и их координацию в ведущих научных центрах России и за рубежом. Таким образом, по результатам конференции можно сделать следующие основные выводы.

1. Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России и странах СНГ. Она проходила уже в 43-й раз и собрала на свои заседания более 600 участников из научных центров России и других стран. Число российских (84) и иностранных организаций (22), представивших доклады на конференцию, стабильно остается на высоком уровне.

2. Конференция способствовала решению научных проблем по направлениям: магнитное удержание высокотемпературной плазмы, инерциальный термоядерный синтез, физические процессы в низкотемпературной плазме, физические основы плазменных и лучевых технологий. Докладывались и обсуждались работы, связанные с реализацией международного проекта ИТЕР. Ежегодно происходящий обмен информацией и опытом между учеными России, стран дальнего и ближнего зарубежья способствует установлению научных контактов между ведущими мировыми научными центрами, занимающимися проблемами физики плазмы и УТС. Это подтверждается большим количеством работ, совместно выполненных сотрудниками научных центров различных стран.

3. Уровень экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных российских установках в области магнитного удержания горячей плазмы, пока еще достаточно высок, несмотря на физическое и моральное старение экспериментального и диагностического оборудования.

4. Растет число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, увеличивается интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции.

5. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в ведущих научных центрах Европы, Японии и США. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых в области физики плазмы остаются высокими, и они востребованы мировым научным сообществом.

6. На конференции было представлено 103 доклада, результаты которых получены в рамках действующих проектов РФФИ, что составляет 30 % от всех докладов, заслушанных на конференции. Проблематика этих проектов РФФИ соответствует перечню актуальных проблем, рассматривавшихся на конференции. По секциям поддержаны: магнитное удержание высокотемпературной плазмы — 21 доклад из 67 (31 %), инерциальный термоядерный синтез — 26 докладов из 59 (44 %), физические процессы в низкотемпературной плазме — 27 докладов из 96 (28 %), физические основы плазменных и лучевых технологий — 25 докладов из 67 (37 %).

7. Оргкомитетом конференции издана книга «XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу». Сборник тезисов докладов. — М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. — 412 с. ISBN 978-5-9903264-6-0. Материалы конференции также размещены на сайте конференции http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIII/Zven_XLIII.html.

Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями №№ 01200953485 (Исследование высокотемпературной плазмы), 01200953486 (Физические основы плазменных технологических процессов), 01200953487 (Плазмохимия термонеровесных и нестационарных плазменных объектов), 01200953488 (Динамика токонесущей плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях), 01200953489 (Мощные плазменные релятивистские источники СВЧ-излучения), а также по программе РАН I.111П «Фундаментальные проблемы удержания и нагрева плазмы в магнитных ловушках» и в рамках реализации проекта РФФИ 16-02-20018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 8–12 февраля 2016 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. — М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. — 412 с. ISBN 978-5-9903264-6-0.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIII/Zven_XLIII.html

New research trends in plasma physics and controlled fusion in Russia (Review of the XLIII International Zvenigorod Conference 2015)

I. A. Grishina¹, V. A. Ivanov^{1,2}, and L. M. Kovrizhnych¹

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilova ul., Moscow, 199911, Russia

² National Research Nuclear University “MEPHI”
37 Kashirskoe shosse, 115409, Moscow, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Received May 17, 2016

The article provides a review of the most interesting results presented at the annual XLIII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, which has been held from 8 to 12 February 2016 in the town of Zvenigorod, Moscow region. The main research trends in plasma physics in Russia are analyzed.

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Keywords: plasma physics, nuclear fusion, conference, results.

REFERENCES

1. *XLIII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, February 8-12, 2016. Zvenigorod.*

Book of Abstracts. Moscow: Science and Technology Center PLASMAIOFAN, 2016 – pp. 412 [in Russian]. (ISBN 978-5-9903264-6-0).

2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIII/Zven_XLIII.html