



Russian Journal Astrophysical Research. Series A

Has been issued since 2015.
ISSN 2410-9347
2015. Vol.(1). Is. 1. Issued 4 times a year

EDITORIAL BOARD

Dr. Prokopiev Evgeny – Kurchatov Institute, Institute of Theoretical and Experimental Physics, Russian Federation (Editor in Chief)

Dr. Bisnovaty-Kogan Gennady – Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Dr. Blinnikov Sergei – Kurchatov Institute, Institute of Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russian Federation

Dr. Md Azree Othuman Mydin – University Sains Malaysia, Penang, Malaysia
Dr. Moskalenko Igor – Stanford University, Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford, USA

Dr. Nakariakov Valery – University of Warwick, Coventry, United Kingdom

Dr. Sokoloff Dmitry – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Dr. Suntola Tuomo – Physics Foundations Society, Espoo, Finland

Dr. Tsvetkov Viktor – Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring AEROCOSMOS, Moscow, Russian Federation

The journal is registered by Federal Service for Supervision of Mass Media, Communications and Protection of Cultural Heritage (Russia).

Journal is indexed by: **CrossRef, MIAR, OAJI, Russian Science Citation Index**

All manuscripts are peer reviewed by experts in the respective field. Authors of the manuscripts bear responsibility for their content, credibility and reliability.

Editorial board doesn't expect the manuscripts' authors to always agree with its opinion.

Postal Address: 26/2 Konstitutcii, Office 6
354000 Sochi, Russia

Website: <http://ejournal28.com/>
E-mail: ejtd2013@mail.ru

Founder and Editor: Academic Publishing
House *Researcher*

Passed for printing 16.6.15.

Format 21 × 29,7/4.

Enamel-paper. Print screen.

Headset Georgia.

Ych. Izd. l. 4,5. Ysl. pech. l. 4,2.

Circulation 500 copies. Order № RJAP-1.

Russian Journal of Astrophysical Research. Series A

2015

Is. **1**



Russian Journal of Astrophysical Research. Series A

Russian Journal of Astrophysical Research. Series A

Издается с 2015 г. ISSN 2410-9347.
2015. № 1 (1). Выходит 4 раза в год.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Прокопьев Евгений – НИЦ «Курчатовский институт», Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Москва, Российская Федерация (Главный редактор)

Бисноватый-Коган Геннадий – Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

Блинников Сергей – НИЦ «Курчатовский институт», Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Москва, Российская Федерация

Мд Азри Отхуман Мудин – Университет Малайзии, Пенанг, Малайзия

Москаленко Игорь – Стэнфордский Университет и Институт Кавли для Астрофизики Частиц и Космологии, Стэнфорд, США

Накаряков Валерий – Университет Варвик, Ковентри, Великобритания

Соколов Дмитрий – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Сунтола Туоми – Физическое Общество, Эспоо, Финляндия

Цветков Виктор – Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос", Москва, Российская Федерация

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия (Российская Федерация).

Журнал индексируется в: **CrossRef, MIAR, OAJI, Российский индекс научного цитирования**

Статьи, поступившие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы публикаций.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.

Адрес редакции: 354000, Россия, г. Сочи,
ул. Конституции, д. 26/2, оф. 6
Сайт журнала: <http://ejournal28.com/>
E-mail: ejtd2013@mail.ru

Подписано в печать 16.06.15.

Формат 21 × 29,7/4.

Бумага офсетная.

Печать трафаретная.

Гарнитура Georgia.

Уч.-изд. л. 4,5. Усл. печ. л. 4,2.

Тираж 500 экз. Заказ № RJAP-1.

Учредитель и издатель: ООО «Научный
издательский дом "Исследователь"» -
Academic Publishing House *Researcher*

2015

Is.

1

CONTENTS

System Analysis in Space Research Valery G. Bondur, Viktor Ya. Tsvetkov	4
The Application of Methods of Positron Annihilation Spectroscopy in Nuclear Technology 1. Research of Structural Materials of the Active Zone of the Reactor by the Angular Distribution of Annihilation Photons (ADAP Method) Viktor I. Grafutin, Vladimir A. Ilyukhin, Olga V. Ilyukhina, Evgeny P. Prokopiev, Gennady I. Savel'ev, Nikolai O. Khmelevskii, Yury V. Funtikov	13
Antimatter: Synthesis, Properties and Applications 1. General Principles of Interaction of Matter and Antimatter. Non-Relativistic Theory Evgeny P. Prokopiev	32
Electrical Charge in a Closed Universe Dmitry D. Sokoloff	45

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*



Published in the Russian Federation
Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
Has been issued since 2015.
ISSN: 2410-9347
Vol. 1, Is. 1, pp. 4-12, 2015

DOI: 10.13187/rjar.2015.1.4
www.ejournal28.com



UDC 551.46, 303.732

System Analysis in Space Research

Valery G. Bondur ^a, and Viktor Ya. Tsvetkov ^{a,*}

^a Research Institute of Aerospace Monitoring "Aerocosmos", Russian Federation

Abstract

The article reveals the contents of system analysis in space research. This article describes the systematic space research. It describes full and partial systematic research. It shows the integrity and consistency of space research demonstrated through the study of the sea surface. The article shows that the main objective of space research is to obtain new knowledge. The article shows that the tacit knowledge and spatial knowledge are the constituent parts of knowledge obtained in space research.

Keywords: space research, systems analysis, research integrity, knowledge, spatial knowledge.

Введение

Развитие современного исследования Земли невозможно без применения аэрокосмических методов, технологий и систем. Это обусловлено их неоспоримыми преимуществами, к главным из которых относятся [1]:

- большая обзорность аэрокосмических средств, обеспечивающих возможность производить региональные и глобальные исследования акваторий на обширных площадях;
- оперативность получения информации о различных процессах и явлениях на земной поверхности;
- возможность наблюдений в любых труднодоступных районах;
- возможность получения информации о процессах и явлениях, с различным пространственным и временным разрешением практически в любом масштабе, в различных участках спектра электромагнитных волн;
- высокая достоверность получаемых данных, особенно при сочетании с традиционными измерениями;
- широкий спектр регистрируемых параметров окружающей среды, обеспечивающих возможность решения многих научных и практических проблем;
- возможность передачи космической информации потребителям различных уровней.

Дистанционные аэрокосмические методы зондирования Земли доказали свою эффективность. Однако требования современности приводят к необходимости их теоретического развития и обобщения. таким инструментом обобщения является системный анализ [2, 3].

* Corresponding author

E-mail addresses: vgbondur@aerocosmoc.info (V.G. Bondur), cvj2@mail.ru (V.Ya. Tsvetkov)

Развитие системного анализа

В современной науке исследование систем разного рода проводится в рамках системного подхода, различных специальных теорий систем, в кибернетике, системотехнике, системном анализе и т.д. Принципы системного подхода нашли применение в биологии, образовании, психологии, кибернетике, технике, экономике и др. Системный подход является более общим понятием в сравнении с понятием системный анализ. По мере развития общества происходит всё более разнообразная диверсификация форм отражения реального мира, усложняется характер применяемых систем, воспроизводимых в виде различных моделей и описаний. Общим остается правило «Мир есть совокупность вложенных систем» [4]. Эта совокупность выглядит следующим образом. Вселенная включает её обозримую часть – Метагалактику, составной частью которой является наша Галактика (Млечный путь); наша Галактика включает Солнечную систему; Солнечная система включает планету Земля. Поверхность Земли представляет собой пространство, получившее название геосфера. В геосфере реализуется:

- биосфера – органический мир Земли, включая растительный;
- зоосфера – животный мир Земли;
- гуманосфера – человечество и все, что с ним связано;
- техносфера – пространство Земли, в которой осуществляется материальное производство, транспортные коммуникации, производство и потребление материальных благ;
- энергосфера – все виды энергоресурсов, электростанции, линии электропередач, нефте- и газопроводы, а также другие объекты производства и передачи всех видов энергии;
- инфосфера (информационная сфера) [5] – логически мыслимая форма (или структура), служащая средой, в которой осуществляются другие формы и те или иные конструкции, связанные с добытием, хранением, передачей и производством информации;
- ноосфера – сфера разума, области фиксации осознанных с помощью совокупного интеллекта человечества понятий: известных абсолютных, относительно абсолютных истин.

Таким образом, системность окружающего мира имеет множество, разновидностей и является универсальным свойством. Космические исследования являются инструментом исследования системности в глобальном масштабе.

Системный анализ в прикладном аспекте можно рассматривать как совокупность методов, используемых для раскрытия сущности окружающего мира. Системный анализ как инструмент познания можно рассматривать как метод научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объектов как сложных систем. Он ориентирует исследование на:

- поиск качественных признаков объекта или явления;
- выявление существенных признаков;
- систематизацию признаков и характеристик;
- поиск связей и отношений между признаками и сущностями;
- формирование структуры, отражающей целостность объекта или явления;
- выявление скрытых связей между элементами целостной структуры и структурой и внешней средой;
- поиск темпоральных характеристик;
- сведение совокупности элементов и связей в единую модель.

При анализе неизвестных систем, когда определяются только входные и выходные параметры, используется метод "черного ящика". Суть метода в том, что система рассматривается как "черный ящик" с неизвестной структурой. Наблюдаются только состояния входов и выходов системы, на основании этого выявляется конкретная форма зависимости выходных сигналов от входных. По мере выявления структуры системы и потоков внутри нее она из черного ящика преобразовывается в "белый ящик". В такой системе известна структура и взаимодействия элементов и входных, промежуточных и выходных информационных потоков.

Системный анализ необходимо рассматривать с двух аспектов: аспект объекта исследования и аспект метода анализа. Системный анализ в аспекте объекта исследования –

это анализ, который направлен на исследование объекта как системы и выявление его системных свойств. Системный анализ в аспекте метода анализа – это анализ, который рассматривает систему взаимосвязанных методов анализа как целостную систему. Эти аспекты дают основание ввести понятия полного и частичного системного анализа [6]. Полный системный анализ – это анализ, который отвечает двум аспектам рассмотрения. Не полный (фрагментарный) системный анализ – это анализ, который отвечает первому аспекту рассмотрения, но сам не является целостной системой. Этот анализ исследует объект как систему, но как метод исследования системой не является.

Особенность системного исследования в том, что оно использует модели систем, системные модели и фрагментальные модели. Система в первую очередь направлена на анализ качества и качественных свойств и раскрытие целостности исследуемого объекта или явления. Модель в первую очередь направлена на анализ количественных свойств. Системная модель обладает системными свойствами и может быть рассмотрена как системное (целостное) описание. Фрагментальная модель направлена на раскрытие определенных свойств и закономерностей, но не представляет собой целостное описание объекта исследования, а отражает какой его аспект или сторону. С этих позиций модель можно рассматривать как детализацию системы.

В общей теории систем большое значение имеет качественный анализ. Качество – совокупность свойств, указывающая на то, что собой представляет объект. Она вытекает из объективной определенности объекта, отличающей его от других. Качество всегда связано с количественной определенностью предмета. Качественный анализ, заключается в обнаружении качественных характеристик. Он начинается с исследования объекта во всей полноте, без расчленения его на составные части. Целостное представление об объекте включает механизмы эвристического анализа и позволяет оптимально спланировать дальнейшие определения характеристик качества.

Следующий этап качественного анализа предполагает исследование частей объекта. Важнейшим в качественном анализе является выявление неоднородности (что дает возможность определять структуру) и специфичность (что дает возможность вводит качественные характеристики и определения).

При исследовании структуры используют понятие изоморфизма, уточняющее широко распространенное понятие аналогии и модели. *Изоморфизм* (греч. от *isos* равный... и *morphe* – форма) – соответствие (отношение) между объектами, выражающее тождество их структуры (строения). Для теории систем важным является *системный изоморфизм*. На основе положений системного изоморфизма следует, что, если каждому элементу одной системы соответствует лишь один элемент другой системы, то такие две системы называются изоморфными друг другу. Различают структурный и функциональный системный изоморфизмы. В космических исследованиях изоморфизм один из важных инструментов анализа.

Качество как характеристика объектов, обнаруживающаяся в совокупности их свойств. Оно связано также с переходом количественных изменений в качественные. Переход от качественных характеристик к количественным осуществляется с применением процедур квантификации. *Квантификация* (лат. *quantum* – сколько и *facio* – ... делаю), количественное выражение качественных признаков.

Системность в космических исследованиях

Системность определяют как свойство проявления признаков системности и наличие признаков системы. В космических исследованиях первоначально наблюдают признаки. Затем выделяют существенные и несущественные признаки. Затем выделяют связи между признаками и находят закономерности. При исследовании явлений по закономерностям определяют причинно следственные связи и оценивают динамик процессов и влияние одних факторов на другие.

Покажем системность космических исследований на примере исследования морской поверхности из космоса [1]. При этом следует отметить, что объект характеризуют, как правило, субстанциональные признаки, а явление характеризуется процессуальными признаками. Водная поверхность изменчива и ее характеризуют явления в ней

происходящие. В таблице 1 приведены системные процессуальные признаки и факторы обуславливающие эти признаки.

Таблица 1. Система процессуальных признаков

№	Процессуальные признаки	Обуславливающие факторы
1	Изменение оптических характеристик морской среды	Изменение мутности воды за счет изменения рассеяния света вследствие изменения концентрации взвешенного вещества, а также за счет изменения поглощения света из-за вариаций концентрации поглощающего растворенного органического вещества [7, 8]
2	Изменения гидродинамических параметров водной среды	Возникновение вихрей различных масштабов, полей течений, возбуждение внутренних волн в стратифицированной водной среде [9, 10]
3	Появление пленок и изменение свойств пленок поверхностно активных веществ на поверхности моря	Всплывание растворенной органики естественного и антропогенного характера [11, 12]
4	Вариации полей температуры в океанических областях	Теплообмен между океаном и атмосферой и других процессов. [13, 14]
5	Изменения физико-химических характеристик морской среды	Вариации содержания растворенных органических веществ, фосфора и азота, тяжелых металлов, растворенного кислорода, вариации температуры и солености морской воды, а также других параметров [12, 15]
6	Изменение состояния фитопланктона, присутствующего в морской среде	Изменение внешних условий, например, антропогенные воздействия [12, 14],
7	Изменения уровня океана	Поверхностные геострофические течения, крупномасштабные и мезомасштабные циркуляционные движения, синоптическая изменчивость, приливно-отливные процессы, подводные землетрясения и т.п. [16]

Процессуальные признаки образуют целостную систему. Это целостная система имеет связь с внешней средой по правилу "признак – следствие". Космические исследования решают обратную задачу определяя следствие или закономерность по внешним признакам.

Космические исследования реализуют полный системный анализ, который включает систему методов анализа как целостную систему. В таблице 2 приведена система методов, которая используется в космических исследованиях

Таблица 2. Система методов, используемых в космических исследованиях

№	Система средств наблюдения	Фиксируемые факторы из таблицы 1
1	Фотосъемка черно-белая, спектрзональная, цветная, многозональная	1, 2, 3, 6
2	Тепловая съемка в ИК-диапазоне	4, 5, 6
3	Лазерное зондирование	1, 2, 6, 7
4	Лазерная и радиовысотометрия	2, 7
5	СВЧ-радиометрия	6, 7

Система средств наблюдения, применяемых в космических исследованиях образует целостную систему, поскольку полностью охватывает весь спектр признаков и обуславливающих факторов из [таблицы 1](#). Эта система является ресурсной, так как различные средства наблюдения и измерения дублируют получение информации, что создает возможность контроля и повышает достоверность исследований. Наиболее эффективными, по количеству регистрируемых факторов, являются фотосъемка и лазерное зондирование. Однако фотосъемка имеет два существенных ограничения [17]. Для ее реализации требуется освещенность и не очень высокая контрастность. Последнее условие не соблюдается в северных широтах, где белый отраженный свет от льдов и снега забивает более слабый отраженный свет других объектов.

Получение знаний в космических исследованиях

Любое исследование ставит своей целью получение новых знаний. Особенностью космических исследований является использование неявных и пространственных знаний.

Для лучшего определения неявного знания можно рассмотреть оппозиционную пару [18] «явное знание – неявное знание». С позиций системного подхода явное знание является: формализованным, целостным, интерпретируемым, логически организованным, достоверным, коммуникативным. В когнитивной области явное знание является: обозримым, воспринимаемым, понимаемым, интерпретируемым [19].

К категории неявных знаний [20, 21] относят: не формализованные, не интерпретируемые, фрагментарные (не целостные), противоречивые (логически не организованные), правдоподобные, неявного представления, кодифицированные не на естественном языке. Правдоподобное знание может быть достоверным (в этом случае оно становится явным), а может и не быть достоверным. Однако в общем случае правдоподобное знание требует дополнительного анализа или проверки на достоверность.

В соответствии с циклической моделью Нонаки SECI [22] (Socialization, Externalization, Combination, Internalization) неявные знания переходят в явные, способствуют накоплению явных. Затем явные знания приводят к формированию неявных и так далее. В космических исследованиях выявляют атрибуты, по которым формируют закономерности. По закономерностям проводят дополнительные исследования, которые уточняют, развивают или опровергают первоначальные закономерности.

Космические исследования проводят в реальном пространстве, поэтому значительная часть знаний, получаемых в этих исследованиях является пространственными знаниями [23, 24].

Пространственное знание как подмножество представляет собой объединение декларативного (D), процедурного (P) и конфигурационного (F) координационного (C) – множеств.

$$GK = D \cup P \cup F \cup C$$

Множества D и P имеют пустое пересечение $D \cap P = \emptyset$, поэтому являются дизъюнктивными. В теории искусственного интеллекта такое описание является основой. В пространственном знании появляется еще две составляющих: конфигурационная, которая отвечает за форму; координационная, которая отвечает за локализацию и положение в

пространстве. Именно эти составляющие дают отличие пространственного знания от знания, применяемого в искусственном интеллекте.

Еще одним отличием пространственного знания является возможность его визуального отображения на картах, схемах, фотоизображениях и других видах изображений. При отображении применяют специальные преобразования, позволяющие представлять пространственные знания в визуальной форме удобной для анализа. При исследовании Земли существует понятие геознания [25, 26] и геореференции [27] как инструмента его получения. Космические исследования расширяют объем знаний, накапливаемых человечеством, причем в той области, в которой другие методы исследований бессильны.

Заключение

Системный анализ в космических исследованиях является естественным и полным. Системность объекта исследований вытекает из системности мира и вложенности разных явлений как одних естественных самообразующихся систем в другие. Системность космических исследований организовалась постепенно по мере развития науки и техники и по мере необходимости решения разных задач и получения разных типов информации. Космические исследования как система являются целостной ресурсной системой, отдельные методы которой дополняют и резервируют друг друга. Главной задачей космических исследований является получение новых знаний. Особенность получения этих знаний в том, что космические исследования используют неявные знания и создают пространственные знания и геознания.

Примечания:

1. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии / в книге: Новые идеи в океанологии. М.: Наука. 2004. С. 2-80.
2. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 512 с.
3. Цветков В.Я. Системный анализ при обработке информации. - LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany. 2014. 82 с.
4. Цветков В.Я. Решение проблем с использованием системного анализа // Перспективы науки и образования. 2015. №1. С. 50-55.
5. Иванников А.Д., Тихонов А.Н., Соловьев И.В., Цветков В.Я. Инфосфера и инфология. М: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 176 с.
6. Tsvetkov V.Ya. Dichotomous Systemic Analysis // Life Science Journal 2014; 11(6). Pp. 586-590.
7. Бондур В.Г. Проблемы аэрокосмического мониторинга океана. В сб. Исследования в области океанологии, физики атмосферы, географии, экологии, водных проблем и геокриологии. М.: ГЕОС, 2001. С. 87-94.
8. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // Sea Technology, April, 2004, p. 53-58.
9. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49-67.
10. Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здоровеннов Р.Э., Петров М.П., Цидилина М.Н. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Том 47. № 6. С. 827-846.
11. Арумов Г.П., Бондур В.Г., Крышталь В.Я. и др. Пространственный спектральный анализ радиолокационных и фотографических изображений морской поверхности при наличии нефтяных загрязнений. - Препринт ИКИ АН СССР, Пр-616, 1981. 19 с.
12. Бондур В.Г., Зубков Е.В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многоспектральным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54-61.

13. Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
14. Бондур В.Г., Савин А.И. Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.
15. Bondur V.G., Filatov N.N. Study of physical processes in coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing // Proceeding of the 7 Workshop on Physical processes in natural waters. 2-5 July 2003. Petrozavodsk, Russia. P. 98–103.
16. Иванов В.В. Интерпретация спутниковых измерений вариаций уровня моря // Исследование Земли из космоса. 2003. № 3. С. 85–92.
17. Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. М.: Картоцентр-Геодезиздат, 2001. 224 с.
18. Tsvetkov V.Ya. Opposition Variables as a Tool of Qualitative Analysis // World Applied Sciences Journal. 2014. 30 (11). P. 1703-1706.
19. Tsvetkov V.Ya. Cognitive information models. // Life Science Journal. 2014. 11(4). Pp. 468-471.
20. Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension*. London: Routledge and Kegan Paul.
21. Цветков В.Я. Неявное знание и его разновидности // Вестник Мордовского университета. 2014. Т. 24. № 3. С. 199-205.
22. Nonaka, I. (1994). A dynamic theory of organizational knowledge creation. *Organization Science*, 5(1), 14-37.
23. Benjamin Kuipers. Modeling Spatial Knowledge (1978) // Cognitive Science. №2. p. 129-153.
24. Цветков В.Я. Пространственные знания // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. №7. С. 43-47.
25. Кулагин В.П., Цветков В.Я. Геознание: представление и лингвистические аспекты // Информационные технологии. 2013. №12. С. 2-9.
26. Лобанов А.А. Геознание как новая форма знания // Перспективы науки и образования. 2014. №5. С. 37-44.
27. Розенберг И.Н., Вознесенская М.Е. Геознания и геореференция // Вестник Московского государственного областного педагогического университета. 2010. № 2. С. 116-118.

References:

1. Bondur V.G. Aerospace methods in modern Oceanology / book *New Ideas in oceanography*. М.: Nauka. 2004. p. 2-80.
2. Volkova V.N., Denisov A.A. Fundamentals of systems theory and systems analysis. SPb.: Publisher SPbGTU, 2001. 512 p.
3. Tsvetkov V.Ya. Systematic analysis of information processing - LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany. 2014. 82 p.
4. Tsvetkov V.Ya. Solving problems using a systematic analysis // *Prospects of Science and education*. 2015. №1. p. 50-55.
5. Ivannikov A.D., Tikhonov A.N, Soloviev I.V., Tsvetkov V.Ya. *Infosphere and infologiya*. М: TORUS PRESS, 2013. 176 p.
6. Tsvetkov V.Ya. Dichotomous Systemic Analysis // *Life Science Journal* 2014; 11(6). Pp. 586-590.
7. Bondur V.G. Problems of aerospace monitoring of the ocean. In the coll. *Research in the field of oceanography, physics of the atmosphere, geography, ecology, water problems and Geocryology*. М.: GEOS, 2001. p. 87-94.
8. Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004, p. 53–58.
9. Bondur V.G., Grebenyuk Y.V. Remote indication of anthropogenic impacts on the marine environment caused by recessed sinks: modeling, experiments // *Study of Earth from space*. 2001. № 6. p. 49-67.

10. Bondur V.G., Filatov N.N., and other studies of hydrophysical processes for monitoring anthropogenic impacts on coastal water area (for example, Mamala Bay, Oahu, Hawaii) // *Oceanology*. 2007. Volume 47. № 6. p. 827-846.
11. Arumov G.P., Bondur V.G., Kryshchal V.Ya. et al. Spatial spectral analysis of radar and photographic images of the sea surface in the presence of oil pollution. - Preprint IKI USSR Academy of Sciences, Pr-616, 1981. 19p.
12. Bondur V.G., Zubkov E.V. Allocation of small-scale inhomogeneities of the optical characteristics of the upper layer of the ocean from multispectral satellite images of high resolution. Part 1. The effects of the discharge of drainage channels in the coastal waters // *Studies of Earth from space*. 2005. № 4. p. 54-61.
13. Bondur V.G. Principles of building space monitoring system of the Earth in environmental and natural resource purposes // *Proceedings of the higher educational institutions. Surveying and aerial photography*. 1995. № 2. p. 14-38.
14. Bondur V.G., Savin A.I. The concept of creating environmental monitoring systems in the environmental and natural resource // *to study the Earth from space*. 1992. № 6. p. 70-78.
15. Bondur V.G., Filatov N.N. Study of physical processes in coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing // *Proceeding of the 7 Workshop on Physical processes in natural waters*. 2-5 July 2003. Petrozavodsk, Russia. P. 98-103.
16. Ivanov V.V. Interpretation of satellite measurements of sea-level fluctuations // *Study of Earth from space*. 2003. № 3. p. 85-92.
17. Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya. Geoinformation analysis of remote sensing data. M.: Kartotsentr-Geodezizdat, 2001. 224 p.
18. Tsvetkov V. Ya. Opposition Variables as a Tool of Qualitative Analysis // *World Applied Sciences Journal*. 2014. 30 (11). P. 1703-1706.
19. Tsvetkov V.Ya. Cognitive information models. // *Life Science Journal*. 2014; 11(4). Pp. 468-471.
20. Polanyi, M. (1966). *The tacit dimension*. London: Routledge and Kegan Paul.
21. Tsvetkov V.Ya. Tacit knowledge and its variants // *Herald of the University of Mordovia*. 2014. T.24, 3. p. 199-205.
22. Nonaka, I. (1994). A dynamic theory of organizational knowledge creation. *Organization Science*, 5(1), 14-37.
23. Benjamin Kuipers. Modeling Spatial Knowledge (1978) // *Cognitive Science*. №2. p. 129-153.
24. Tsvetkov V.Ya. Spatial knowledge // *International Journal of applied and fundamental research*. 2013. №7. p. 43-47.
25. Kulagin V.P., Tsvetkov V.Ya. Geo knowledge: representation and linguistic aspects // *Information Technology*. 2013. №12. p. 2-9.
26. Lobanov A.A. Geoknowledge as a new form of knowledge // *Prospects of Science and education*. 2014. №5. p. 37-44.
27. Rosenberg I.N., Voznesenskaya M.E. Geoknowledge and georeference // *Herald of Moscow State Regional Pedagogical University*. 2010. № 2. p. 116-118.

УДК 551.46, 303.732

Системный анализ в космических исследованиях

Валерий Григорьевич Бондур^а, Виктор Яковлевич Цветков^{а,*}

^а Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга "Аэрокосмос",
Российская Федерация

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: vgbondur@aerocosmos.info (В.Г. Бондур),
cvj2@mail.ru (В.Я. Цветков)

Аннотация. Статья раскрывает содержание системного анализа в космических исследованиях. Статья описывает системность космических исследований. Описана полная и частичная системность научных исследований. Целостность и системность космических исследований показана на примере исследования морской поверхности. Статья показывает, что главной задачей космических исследований является получение новых знаний. Статья показывает, что неявные знания и пространственные знания являются составляющими компонентами знания, получаемого при космических исследованиях.

Ключевые слова: космические исследования, системный анализ, целостность исследований, знания, пространственные знания.

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*

Published in the Russian Federation
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
 Has been issued since 2015.
 ISSN: 2410-9347
 Vol. 1, Is. 1, pp. 13-31, 2015

DOI: 10.13187/rjar.2015.1.13
www.ejournal28.com



UDC 621.315

The Application of Methods of Positron Annihilation Spectroscopy in Nuclear Technology

1. Research of Structural Materials of the Active Zone of the Reactor by the Angular Distribution of Annihilation Photons (ADAP Method)

Viktor I. Grafutin^a, Vladimir A. Ilyukhin^a, Olga V. Ilyukhina^a,
 Evgeny P. Prokopiev^{a,*}, Gennady I. Savel'ev^a,
 Nikolai O. Khmelevskii^a and Yury V. Funtikov^a

^aRussian Research Center "Kurchatov Institute", Institute for Theoretical and Experimental Physics, Russian Federation

Abstract

There were conducted the experimental studies of steels used in the nuclear industry by the method of positron annihilation spectroscopy (method ADAP). The processing of experimental results and its comparison with the published data allowed to reveal the vacancy defects, including caused by neutron irradiation, and to determine its size.

Keywords: spectroscopy, nuclear technology, positrons, the method of ADAP.

Введение

Работа посвящена исследованию корпусных сталей, используемых в действующих реакторах ВВЭР-440 [1, 2]. В процессе эксплуатации реакторов этого типа происходит охрупчивание конструкционных материалов. Считается, что основной причиной охрупчивания корпусных реакторных сталей является образование нанокластеров, содержащих преимущественно медь и фосфор [3, 4]. В настоящее время определены режимы отжига для продления срока службы корпусов этих типов реакторов и проведен отжиг корпусов. Дальнейшая эксплуатация отожженных корпусов реакторов, определение возможностей повторного отжига корпусов требуют проведения дополнительных исследований состояния материала в отожженном и повторно облученном состояниях. Для обоснования разрабатываемых прогнозных моделей необходима экспериментальная информация об эволюции тонкой структуры радиационно-индуцированных состояний. В рамках международной программы PRIMAVERA проведены комплексные исследования материала корпусов реакторов ВВЭР-440 с использованием различных физических методик [5-9].

Данная работа посвящена исследованию образцов этих сталей одним из методов позитронной аннигиляционной спектроскопии. Методы позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) являются одними из эффективных неразрушающих методов

* Corresponding author
 E-mail addresses: eprokopiev@mail.ru (E.P. Prokopiev)

исследования нанообъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции позитронов.

В последние годы комбинация этих методов широко и успешно используется для исследования радиационных дефектов в материалах атомной техники [10-16].

Целью настоящей работы являлось исследование электронных и дефектных свойств реакторных сталей путем измерения углового распределения аннигиляционных фотонов (метод УРАФ) в образцах этих сталей. Исследованы образцы сварных соединений сталей с различным содержанием фосфора, облученные нейтронами до флюенсов $6 \cdot 10^{19}$ н/см², облученные и отожженные [17-19].

Материалы и методы

Для исследуемых материалов экспериментально определены такие важные характеристики металлов, как энергия Ферми, удельное число свободных электронов, приходящихся на один атом металла, их концентрация в зоне проводимости, размеры и концентрация радиационно-индуцированных дефектов.

Исследовано влияние нейтронного облучения и последующего отжига на свойства конструкционных материалов, используемых в реакторах ВВЭР (облучение образцов свидетелей проводилось в каналах Ровенской АЭС). Химический состав и состояние исследованных образцов сталей представлен в таблицах 1 и 2.

Метод ПАС

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) является современным методом изучения структуры вещества [10-20]. Ее суть состоит в имплантации в исследуемый образец позитронов, образующихся в результате бета+ - распада радиоактивного источника (как правило, ядер изотопов Na-22, Cu-64, Co-58, Ti-44) и последующей регистрации параметров аннигиляционного гамма-излучения. В позитронной спектроскопии позитрон выполняет функции зонда, аннигиляционные характеристики которого определяются свойствами среды, окружающей его в месте аннигиляции.

В веществе процесс аннигиляции позитронов может протекать как в свободных соударениях с электронами среды, так и через образование связанных состояний позитронов с электронами, атомами, молекулами и различными дефектами, при этом каждый канал аннигиляции вносит свой специфический вклад в экспериментальный аннигиляционный спектр.

Естественно, для корректной интерпретации экспериментальных спектров ПАС необходимы надежные теоретические модели образования позитронных состояний, их взаимодействия с дефектами и продуктами радиолиза среды.

В настоящее время активно используются три основные разновидности ПАС:

1) регистрация временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ). Она состоит в измерении времени жизни каждого имплантированного в образец e^+ (то есть интервала времени между регистрацией стартового гамма-кванта, испускаемого радиоактивным ядром – источником позитрона в момент бета+ - распада, и одного из аннигиляционных фотонов с энергией 511 кэВ);

2) измерение углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ). В этом случае регистрируется отклонение от 180 градусов угла разлета фотонов при 2γ -аннигиляции;

3) измерение доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ). Здесь измеряется отличие в энергии аннигиляционных фотонов (при 2γ -аннигиляции) от 511 кэВ.

Метод ВРАФ дает сведения об электронной плотности в месте аннигиляции позитрона, а методы УРАФ и ДУАЛ дают информацию о распределении импульсов электронов среды. Таким образом, методики ВРАФ и УРАФ дополняют друг друга и позволяют экспериментально измерять параметры всех каналов аннигиляции позитронов в среде и тем самым получать развернутую информацию об электронных и дефектных свойствах среды. В проводящих средах дефекты (например, вакансии), как правило, обладают избыточным отрицательным зарядом и поэтому притягивают позитроны. Исследование методом ВРАФ облученных нейтронами образцов сталей реакторов ВВЭР-440 показало, что доля

позитронов, захваченных радиационно-индуцированными дефектами, зависит от флюенса нейтронов и при больших флюенсах ($\approx 10 \cdot 10^{20}$ н/см²) практически все позитроны захватываются дефектами и аннигилируют в них [18, 19].

Сопоставление измеряемых времен жизни позитронов в исследуемых материалах с известными временами жизни в дефектах различного типа позволяет идентифицировать тип дефекта, а по измерению доли позитронов, аннигилирующих в этом дефекте, получать информацию о концентрации дефектов. Параметры угловых аннигиляционных спектров содержат информацию об энергии аннигилирующей позитрон-электронной пары. Поскольку в процессе аннигиляции участвуют практически термализованные позитроны, то измеряемая энергия аннигилирующей позитрон-электронной пары определяется в основном энергией электронов атомов среды, окружающих дефект. Сопоставление измеряемой энергии с табличными значениями потенциалов ионизации дает информацию о химическом составе среды в месте аннигиляции позитронов, а энергия позитронов характеризует размер дефектов. Применение позитронной методики в атомной отрасли позволяет исследовать радиационно-индуцированные дефекты размером до одного кубического нанометра. Порог чувствительности ПАС в отношении подобных дефектов составляет примерно 10^{14} дефектов/куб.см.

Методика

Установка по измерению углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) расположена в экспериментальном зале реактора ИРТ МИФИ. Источником позитронов в установке служит радиоактивный изотоп Cu^{64} , получаемый облучением нейтронами изотопа меди Cu^{63} в ядерном реакторе: $\text{Cu}^{63} + n = \text{Cu}^{64}$. Близость установки к ядерному реактору позволяет проводить работы с использованием мощных (несколько Кюри) источников позитронов, что существенно расширяет возможности установки, а тем самым и класс исследуемых сред.

Используемые в измерениях источники позитронов представляли собой пластинки размером $2 \times 2 \times 0,2$ см, вырезанные из фольги электролитической меди. Пластинки облучались сутки в реакторе ИРТ МИФИ нейтронами до флюенса $1,7 \cdot 10^{18}$ н/см².

После выгрузки из реактора позитронные источники активностью несколько Кюри помещались в облучательную часть установки УРАФ. Угловое разрешение установки составляло 0,4 мрад. Число совпадений в максимуме кривой достигало $(10 \div 16) \cdot 10^3$.

Метод углового распределения аннигиляционных фотонов УРАФ [13-15] основан на регистрации совпадений от двух гамма-квантов с энергией ~ 511 кэВ, возникающих в результате аннигиляции электрон-позитронных пар и разлетающихся в противоположные стороны в системе центра масс пары. При аннигиляции электрон-позитронной пары выполняются законы сохранения импульса и энергии. Если центр масс пары неподвижен ($v = 0$), то оба γ -кванта разлетаются в противоположных направлениях (угол $\theta = 0$) с одинаковой энергией $k_{1c} = k_{2c} = m_0 c^2 = 0,511$ МэВ. Если $v \neq 0$, то углы между направлениями разлета γ -квантов будут отличаться от 180° , а их энергия уже не будет равна 0,511 МэВ. Таким образом, измерение угла θ (отклонение угла разлета γ -квантов от 180°) позволяет определить импульс e^+e^- пары. Позитроны к моменту аннигиляции термализуются, поэтому угол разлёта γ -квантов определяется импульсом электрона.

В рамках модели свободного электронного газа электроны проводимости в металле имеют импульсное распределение:

$$n_e(p) = \left[\exp\left(\frac{(p^2/2m) - \varepsilon_F}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

где ε_F - энергия Ферми;

k_B - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура.

Для низких температур это распределение близко к прямоугольному, поэтому в кривых УРАФ металлов наблюдается параболическая $f_p(\theta)$ компонента:

$$f_p(\theta) = \begin{cases} (3I_p / 4\theta_p^3) \cdot (\theta_p^2 - \theta^2), & |\theta| \leq \theta_p; \\ 0, & |\theta| > \theta_p. \end{cases} \quad (2)$$

Аннигиляция позитронов в металлах и сплавах происходит как на электронах зоны проводимости, так и на электронах ионного остова. Оставшаяся после вычитания параболы зависимость, как правило, описывается одной $f_g(\theta)$ или суммой нескольких гауссовых кривых вида:

$$f_g(\theta) = (I_g / \sqrt{2\pi} \cdot \theta_g) \cdot \exp(-\theta^2 / 2\theta_g^2) \quad (3)$$

где: I_g - интенсивность гауссовой компоненты;

θ_g - дисперсия гауссовой кривой;

θ_p - угол пересечения параболой оси абсцисс θ («угол отсечки»).

На рис. 1 приведен характерный вид измеренных спектров УРАФ с разложением на параболическую и гауссову компоненты. После коррекции спектров угловой корреляции их разложение на параболические и гауссовы составляющие с учётом функции разрешения установки проводилось на ЭВМ с использованием программы ACARFIT.

Определяя из эксперимента параметр θ_p , можно оценить импульс Ферми p_F и энергию Ферми ε_F исследуемого металла:

$$p_F = \theta_p \cdot m \cdot c; \quad \varepsilon_F = \theta_p^2 \cdot (mc^2 / 2). \quad (4)$$

В приближении модели свободного электронного газа параметр θ_p определяет удельное число свободных электронов Z_c (число электронов проводимости), приходящихся на один атом металла, и их концентрацию $n_p(\theta)$

$$Z_c = (8\pi/3) \cdot (mc^2/h)^3 \cdot (A/\rho N_A) \cdot \theta_p^3; \quad (5)$$

$$n_p(\theta) = Z_c \cdot n_A = (8\pi/3) \cdot (mc^2/h)^3 \cdot \theta_p^3, \quad (6)$$

а параметр θ_g – энергию остовных электронов (т.е. электронов, для которых угловое распределение аннигиляционных фотонов в спектрах УРАФ описывается гауссовой функцией)

$$\varepsilon_g = (3/2) \cdot (mc^2/2) \cdot \theta_g^2.$$

Здесь N_A – число Авогадро; h – постоянная Планка; A – атомный вес металла; ρ – его плотность.

Принято сопоставлять экспериментально получаемые значения Z_c , ε_F , n_p с аналогичными параметрами идеального металла. Идеальным металлом считают такой металл, в котором все валентные электроны переходят в зону проводимости. В этом случае удельное число электронов проводимости Z_c определяется номером группы периодической системы элементов Менделеева, а энергия Ферми ε_F и концентрация электронов проводимости n_p , в рамках модели свободного электронного газа, являются его константами

$$\varepsilon_F = (h^2/8m) \cdot (3/\pi \cdot n_A \cdot Z_c)^{2/3}; \quad (7)$$

$$n_p = Z_c \cdot n_A = (N_A \rho / A) \cdot Z_c, \quad (8)$$

где n_A - концентрация атомов в единице объема металла.

Обработка экспериментальных результатов

На рис. 1 приведен характерный вид спектров УРАФ с разложением на параболическую и гауссовы составляющие. Использовалось два типа обработки экспериментальных спектров: разложение на один гаусс и параболу и разложение на два гаусса и параболу.

Наилучший χ^2 наблюдался при разложении экспериментальных спектров УРАФ на три компоненты – два гаусса и параболу. Каждая составляющая спектра УРАФ несет информацию о своем канале аннигиляции позитронов. Определены параметры каждого канала аннигиляции позитронов для каждого образца стали. Результаты представлены в виде таблиц (3-5) и в графической форме (рис. 2-3).

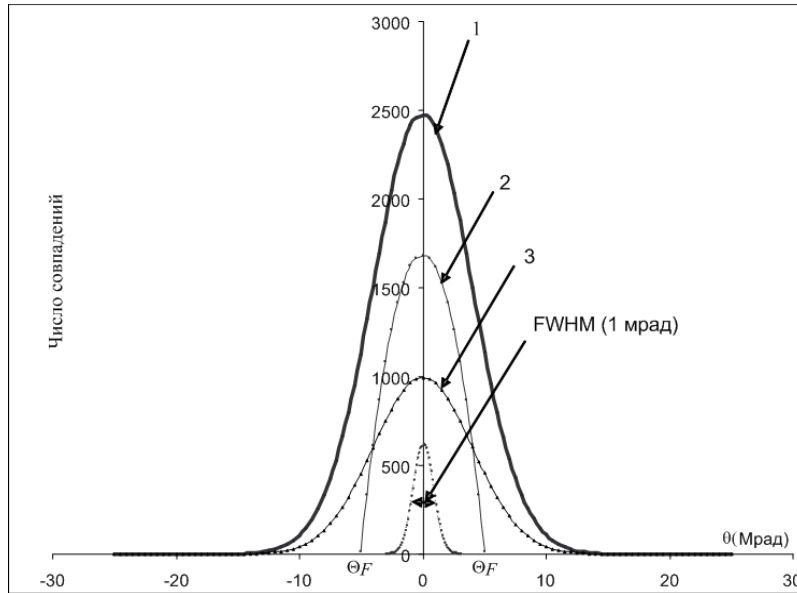


Рис. 1. Характерное угловое распределение аннигиляционных фотонов в образцах стали:

- (1) – кривая УРАФ, построенная по экспериментальным точкам;
 (2) – параболическая компонента спектра; (3) – гауссова компонента спектра.

FWHM (full width half-maximum) – полная ширина гауссовой кривой на половине максимума

В [таблицах 3-5](#) представлены вероятности аннигиляции позитронов по каждому каналу, энергии Ферми, концентрации свободных электронов в зоне проводимости и энергии аннигилирующих позитрон-электронных пар.

Для выяснения роли отжига на облученные образцы строились разностные кривые нормированных на единицу угловых распределений аннигиляционных фотонов в облученных и отожженных и исходных образцах. Для этих целей создана специальная математическая программа обработки экспериментальных спектров.

Кроме реакторных сталей измерены спектры УРАФ в образцах чистого железа, хрома, ванадия и никеля – основных элементов исследуемых сталей.

При обработке экспериментальных спектров УРАФ гауссовы составляющие спектра аппроксимировались функцией

$$\varphi(\theta) = A \cdot \exp(-\theta^2/2\theta_g^2), \quad (9)$$

где θ_g - дисперсия.

В [таблицах 3-5](#) приведены значения Γ_g - ширины гауссовой кривой на полувысоте и θ_p - угла пересечения параболой оси θ .

$$\Gamma_g = 1,665109 \cdot \theta_g \quad (10)$$

Энергия

$$E_g = \frac{3}{2} \cdot \frac{mc^2}{2} \cdot \theta_g^2 = 0,0693246 (\Gamma_g)^2, \text{ где } [\Gamma_g] = \text{мрад}, [E_g] = \text{эВ}, \quad (11)$$

Энергия Ферми

$$E_f = \theta_p^2 \cdot (mc^2/2), \text{ где } [\theta_p] = \text{мрад}, [E_f] = \text{эВ}. \quad (12)$$

I_p, I_{g1}, I_{g2} – интенсивности параболической и гауссовых компонент спектра УРАФ.

E_{g1}, E_{g2} – энергии аннигилирующих позитрон-электронных пар.

Концентрация электронов в зоне проводимости связана с параметрами спектра УРАФ и с энергией Ферми выражениями

$$n_p(\theta) = (8\pi/3) \cdot (mc^2/h)^3 \cdot \theta_p^3 = 5,942 \cdot 10^{20} \theta_p^3, \text{ см}^{-3}. \quad (13)$$

$$n_p(\theta) = 4,6 \cdot 10^{-21} \cdot (E_f)^{3/2} \text{ см}^{-3}, \text{ где энергия Ферми в эВ}. \quad (14)$$

Обсуждение экспериментальных результатов

Для исследуемых сплавов экспериментально определены такие важные характеристики металлов, как энергия Ферми, удельное число свободных электронов, приходящихся на один атом металла, и их концентрация в зоне проводимости, размер и концентрация радиационных дефектов.

Проведены измерения углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) в необлученных, облученных, облученных и отожженных образцах сталей действующих реакторов ВВЭР-440. Исследованы образцы сварных швов с различным содержанием фосфора и с разной степенью облучения. Образцы облучались в каналах реактора Ровенской АЭС. Флюенс нейтронов варьировался от $1 \cdot 10^{19}$ н/см² до $6 \cdot 10^{19}$ н/см².

Химический состав и состояние исследованных образцов сталей представлен в [таблицах 1-2](#).

Таблица 1. Химический состав исследованных образцов стали

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
LP	0.04	0.04	1.12	0.027	0.013	1.42	0.13	0.49	0.16	0.19
MP	0.04	0.39	1.15	0.031	0.013	1.42	0.13	0.50	0.16	0.18
HP	0.05	0.36	1.09	0.038	0.014	1.54	0.13	0.51	0.16	0.19

LP – Сварной шов с «низким» содержанием фосфора

MP – Сварной шов со «средним» содержанием фосфора

HP – Сварной шов с «высоким» содержанием фосфора

Таблица 2. Состояние исследованных образцов стали реакторов ВВЭР-440: 10 x 10 x 1 мм

Маркировка образцов	P (%)	Состояние образцов	Флюенс $\times 10^{19} \text{H}/\text{cm}^2$ ($E > 0.5 \text{ МэВ}$)	Кол-во
HP	0.038	необлученные	0	2
MP	0.031	необлученные	0	2
LP	0.027	необлученные	0	2
HP	0.038	облученные	1.22	2
MP	0.031	облученные	1.24	2
LP	0.027	облученные	1.22	2
MP	0.031	облученные	6.39	2
HP	0.038	облученные	5.95	2
LP	0.027	облученные	5.95	2
HP	0.038	облученные+ отожженные	5.71	2
MP	0.031	облученные + отожженные	5.94	2
LP	0.027	облученные + отожженные	5.71	2
Суммарное количество		Все позиции		24

Для выяснения влияния отжига на облученные образцы строились разностные кривые нормированных на единицу угловых распределений аннигиляционных фотонов в облученных и отожженных и исходных образцах.

Сопоставление разностных спектров УРАФ необлученных образцов с различным содержанием фосфора в пределах ошибок показало их идентичность (рис. 2).

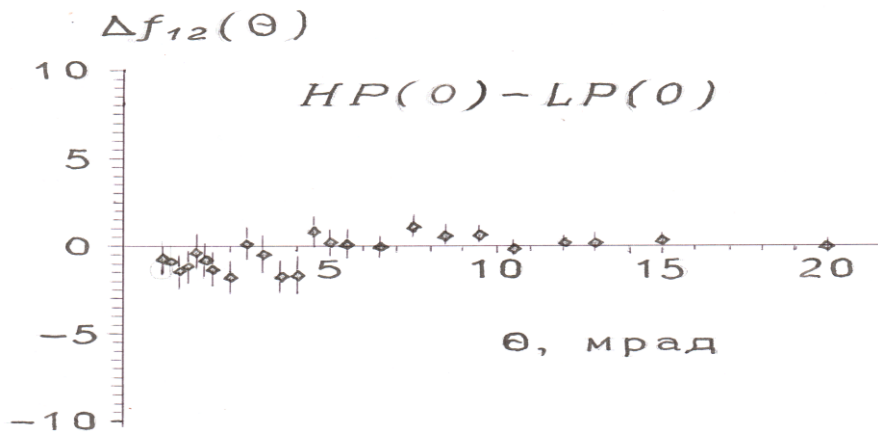


Рис. 2. Разностный спектр УРАФ необлученных образцов с высоким (HP) и низким (LP) содержанием фосфора

Таким образом, фосфор не является позитрончувствительным элементом. В спектрах УРАФ образцов стали HP с высоким содержанием фосфора, облученных до больших флюенсов $59 \cdot 10^{18} \text{ H}/\text{cm}^2$, в области малых углов, а следовательно и малых энергий ($< 1 \text{ эВ}$) аннигилирующих позитрон-электронных пар, наблюдается повышенная интенсивность (рис. 3).

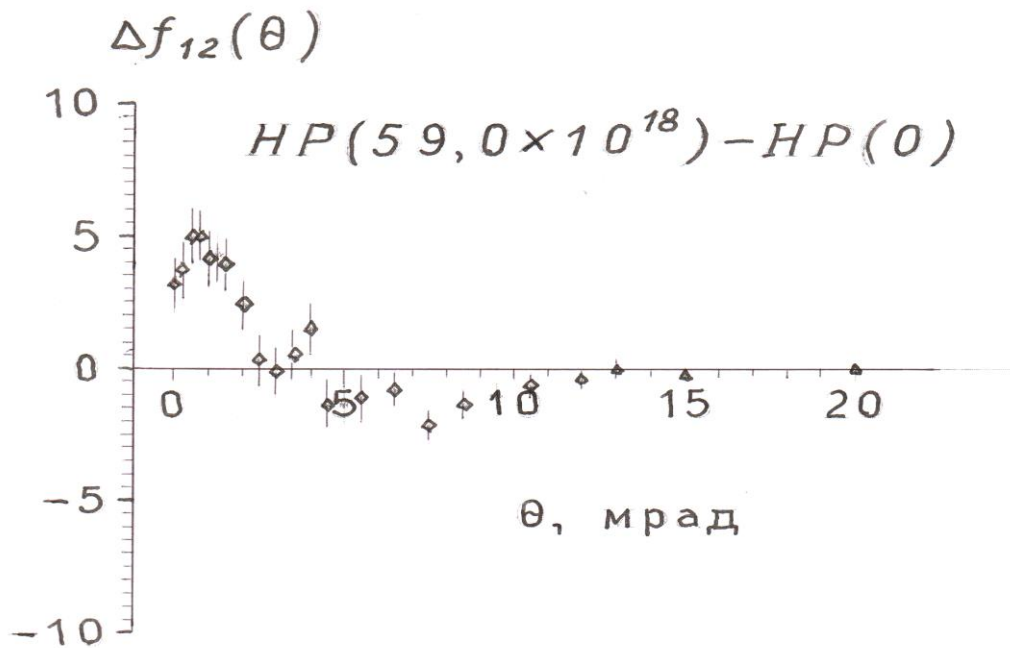


Рис. 3. Разностный спектр УРАФ облученных и необлученных образцов с высоким (НР) содержанием фосфора

Это может быть связано с аннигиляцией позитронов (квазипозитрония) в радиационных дефектах, индуцированных нейтронным облучением, либо порах на границе раздела трех кристаллитов. Существует большое количество экспериментальных данных, косвенно подтверждающих возможность образования позитрония. Так, в работе [21] в образцах Fe, Al, Ni, Pd, Cu наблюдалась компонента с маленькой интенсивностью и со временем жизни порядка наносекунды, в нашей работе [22] по исследованию пористого кремния с поверхностью, декорированной палладием, также наблюдался термализованный позитроний. При этом экспериментально определенный размер пор составлял 10–20 Å. Вообще, по нашему мнению, интенсивность данной компоненты должна зависеть от размера кристаллитов. Если размер кристаллитов много больше длины диффузии термализованных позитронов, т.е. ≈ 100 нм, то большая часть позитронов будет аннигилировать внутри кристаллитов и на границе раздела зерен и, следовательно, уменьшается вероятность захвата позитронов дефектами в тройном стыке кристаллитов. Из параметров ширины узкого пика (рис. 3) можно оценить размеры радиационных дефектов. Ширина на полувысоте этого пика равна примерно 3–4 миллирадиана. Такому уширению соответствует полость радиусом ≈ 4 –5 Å. Интенсивность этого пика увеличивается с увеличением флюенса и значительно уменьшается в отожженных образцах сталей. В образцах с низким содержанием фосфора, LP, также наблюдается узкая составляющая с аналогичной шириной. Отжиг на интенсивность этой составляющей практически не оказывает влияния.

В образцах стали со средним содержанием фосфора МР узкая составляющая слабо выражена и при низких флюенсах $12,4 \cdot 10^{18}$ н/см² практически незаметна.

В [таблицах 3-5](#) представлены экспериментальные результаты при двух вариантах обработки экспериментальных спектров УРАФ: разложение на гаусс и параболу, разложение на два гаусса и параболу.

В этих таблицах приведены вероятности аннигиляции позитронов по каждому каналу, энергии Ферми, концентрации свободных электронов в зоне проводимости и энергии аннигилирующих позитрон-электронных пар.

Таблица 3. Параметры спектров УРАФ для образцов стали LP

Характеристика образцов	Γ_{g1} , мрад	I_{g1} , %	E_{g1} , эВ	Γ_{g2} , мрад	I_{g2} , %	E_{g2} , эВ	θ_p отсечка (мрад.)	I_p , %	E_f , эВ	$N_p(\theta)$ [10^{22}cm^{-3}]
необлученные	13,20 $\pm 0,07$	82,94 $\pm 3,00$	12,00 $\pm 0,01$				5,74	17,06 $\pm 1,10$	8,41 $\pm 0,88$	11,2
необлученные	10,00 $\pm 0,38$	53,15 $\pm 14,00$	6,91 $\pm 0,05$	16,40 $\pm 0,60$	40,61 $\pm 15,00$	18,60 $\pm 0,08$	5,97	6,24 $\pm 2,70$	9,08 $\pm 5,10$	12,6
облучение (12,2x10 ¹⁸)	13,60 $\pm 0,07$	79,01± $\pm 3,20$	12,80 $\pm 0,01$				5,65	20,99 $\pm 1,00$	8,132 $\pm 0,43$	10,6
облучение (12,2x10 ¹⁸)	9,39 $\pm 0,39$	42,80 $\pm 11,00$	6,09 $\pm 0,05$	16,20 $\pm 0,47$	48,74 $\pm 14,00$	18,10 $\pm 0,07$	5,63	8,46 $\pm 2,90$	8,07 $\pm 3,30$	10,5
облучение (59,5x10 ¹⁸)	13,30 $\pm 0,07$	78,97± $\pm 2,80$	12,20 $\pm 0,01$				5,60	21,03 $\pm 0,87$	8,00 $\pm 0,37$	10,4
облучение (59,5x10 ¹⁸)	8,94 $\pm 0,37$	34,69 $\pm 9,10$	5,52 $\pm 0,05$	15,00 $\pm 0,33$	55,63 $\pm 14,00$	15,50 $\pm 0,05$	5,61	9,68 $\pm 2,70$	8,02 $\pm 2,40$	10,4
облучение (57,1x10 ¹⁸) + отжиг	13,20 $\pm 0,06$	79,73 $\pm 2,40$	12,10 $\pm 0,01$				5,37	20,27 $\pm 0,74$	7,36 $\pm 0,31$	9,2
облучение (57,1x10 ¹⁸) + отжиг	11,60 $\pm 0,40$	63,65 $\pm 17,00$	9,23 $\pm 0,06$	18,80 $\pm 1,70$	20,80 $\pm 14,00$	24,40 $\pm 0,23$	5,31	15,54 $\pm 3,60$	7,18 $\pm 0,82$	8,8

Таблица 4. Параметры спектров УРАФ для образцов стали MP

Характеристика образцов	Γ_{g1} , мрад	I_{g1} , %	E_{g1} , эВ	Γ_{g2} , мрад	I_{g2} , %	E_{g2} , эВ	θ_p отсечка (мрад.)	I_p , %	E_f , эВ	$N_p(\theta)$ [10^{22}cm^{-3}]
необлученные	13,40 $\pm 0,09$	79,07 $\pm 3,60$	12,40 $\pm 0,01$				6,03	20,93 $\pm 1,20$	9,26 $\pm 0,59$	13
необлученные	9,97 $\pm 0,42$	48,06 $\pm 15,00$	6,86 $\pm 0,06$	16,10 $\pm 0,59$	42,53 $\pm 16,00$	17,90± 0,08	6,09	9,40 $\pm 3,40$	9,45 $\pm 3,70$	13,3
облучение (12,4x10 ¹⁸)	13,30 $\pm 0,09$	79,37 $\pm 3,50$	12,20 $\pm 0,01$				5,64	20,63 $\pm 1,10$	8,12 $\pm 0,49$	10,6
облучение (12,4x10 ¹⁸)	9,14 $\pm 0,29$	46,23 $\pm 11,00$	5,76 $\pm 0,04$	15,90 $\pm 0,45$	47,55 $\pm 13,00$	17,50± 0,06	5,81	6,21 $\pm 2,50$	8,62 $\pm 4,70$	11,6
облучение (63,9x10 ¹⁸)	13,90 $\pm 0,08$	77,70 $\pm 2,90$	13,30 $\pm 0,01$				5,66	22,30 $\pm 0,93$	8,17 $\pm 0,37$	10,7
облучение (63,9x10 ¹⁸)	9,16 $\pm 0,40$	35,85 $\pm 9,20$	5,79 $\pm 0,06$	15,90 $\pm 0,38$	53,77 $\pm 13,00$	17,40 $\pm 0,05$	5,68	10,39 $\pm 3,00$	8,23 $\pm 2,70$	10,8
облучение (59,4x10 ¹⁸) + отжиг	12,90 $\pm 0,08$	83,76 $\pm 3,30$	11,50 $\pm 0,01$				5,35	16,24 $\pm 0,92$	7,29 $\pm 0,52$	9,0
облучение (59,4x10 ¹⁸) + отжиг	9,79 $\pm 0,38$	57,04 $\pm 14,00$	6,61 $\pm 0,05$	16,70 $\pm 0,67$	38,09 $\pm 14,00$	19,30 $\pm 0,09$	5,14	4,87 $\pm 2,30$	6,73 $\pm 4,40$	8,0

Таблица 5. Параметры спектров УРАФ для образцов стали НР

Характеристика образцов	Γ_{g1} , мрад	I_{g1} , %	E_{g1} , эВ	Γ_{g2} , мрад	I_{g2} , %	E_{g2} , эВ	θ_p отсечка (мрад.)	I_p , %	E_f , эВ	$N_p(\theta)$ [10^{22}cm^{-3}]
необлученные	13,20 $\pm 0,09$	81,69 $\pm 3,00$	12,30 $\pm 0,01$				6,00	18,31 $\pm 1,20$	9,18 $\pm 0,71$	12,8
необлученные	9,21 $\pm 0,40$	39,33 $\pm 14,00$	5,86 $\pm 0,06$	15,00 $\pm 0,44$	56,05 $\pm 11,00$	15,60 $\pm 0,06$	6,29	4,62 $\pm 2,70$	10,10 $\pm 8,00$	14,8
облучение (12,2x10 ¹⁸)	13,90 $\pm 0,07$	75,09 $\pm 2,40$	13,30 $\pm 0,01$				6,00	24,91 $\pm 0,83$	9,18 $\pm 0,32$	12,8
облучение (12,2x10 ¹⁸)	10,00 $\pm 0,33$	42,42 $\pm 9,20$	6,92 $\pm 0,05$	16,50 $\pm 0,42$	43,69 $\pm 11,00$	18,70 $\pm 0,06$	5,98	13,90 $\pm 2,90$	9,13 $\pm 1,60$	12,7
облучение (59,5x10 ¹⁸)	13,40 $\pm 0,07$	79,34 $\pm 2,60$	12,50 $\pm 0,01$				5,71	20,66 $\pm 0,82$	8,31 $\pm 0,38$	11,0
облучение (59,5x10 ¹⁸)	9,77 $\pm 0,30$	45,81 $\pm 10,00$	6,58 $\pm 0,04$	16,30 $\pm 0,44$	44,16 $\pm 12,00$	18,40 $\pm 0,06$	5,86	10,03 $\pm 2,60$	8,77 $\pm 2,40$	12,0
облучение (57,1x10 ¹⁸) + отжиг	13,80 $\pm 0,09$	77,60 $\pm 3,10$	13,10 $\pm 0,01$				5,65	22,40 $\pm 0,99$	8,13 $\pm 0,39$	10,7
облучение (57,1x10 ¹⁸) + отжиг	9,24 $\pm 0,35$	43,22 $\pm 10,00$	5,89 $\pm 0,05$	16,20 $\pm 0,41$	49,24 $\pm 13,00$	18,00 $\pm 0,06$	5,55	7,54 $\pm 2,70$	7,85 $\pm 3,70$	10,1

Здесь Γ_{gi} – полная ширина (FWHM) гауссовой компоненты на полувысоте, θ_p – угол пересечения параболической компонентой оси θ , E_f (эВ), $N_p(\theta)$ – соответственно, энергия Ферми и концентрация электронов в зоне проводимости, E_{gi} – энергия аннигилирующих электрон-позитронных пар, I_{g1} , I_{g2} , I_p – интенсивности гауссовых и параболической составляющих спектра УРАФ, численно равные отношению площади под соответствующей компонентой спектра к суммарной площади спектра (рис. 1).

Во всех образцах стали облучение и отжиг сопровождаются перестройкой электронной подсистемы – уменьшается энергия Ферми и концентрация электронов в зоне проводимости (таблицы 3-5), что свидетельствует о возникновении дополнительных химических связей.

Для интерпретации полученных результатов измерены с большой статистикой спектры УРАФ в образцах железа высокой чистоты и ряде чистых металлов (Cu, Cr, Mo, Ni), входящих в состав реакторных сталей. В таблице 6 в качестве примера представлены параметры спектров УРАФ для чистого железа и хрома.

Сопоставление результатов обработки спектров УРАФ для исследованных образцов стали со спектрами УРАФ для чистых металлов показывает, что позитроны преимущественно аннигилируют на электронах железа (хрома) – сопоставимы значения энергии E_{g1} и E_{g2} для чистого железа (хрома) с аналогичными параметрами для сталей.

Таблица 6. Параметры спектров УРАФ для образцов чистого железа и хрома

	Γ_{g1} , мрад	I_{g1} , %	E_{g1} , эВ	Γ_{g2} , мрад	I_{g2} , %	E_{g2} , эВ	θ_p отсечка (мрад.)	I_p , %	E_f , эВ	$N_p(\theta)$ 10^{22}cm^{-3}
Fe	12,50 $\pm 0,06$	87,62 $\pm 2,90$	10,80 $\pm 0,01$				5,34	12,38 $\pm 0,72$	7,26 $\pm 0,58$	9
Fe	10,10 $\pm 0,31$	64,99 $\pm 14,00$	7,05 $\pm 0,04$	16,70 $\pm 0,72$	32,29 $\pm 12,00$	19,20 $\pm 0,10$	5,01	2,71 $\pm 1,60$	6,40 $\pm 5,60$	7,45
Cr	11,90 $\pm 0,08$	90,82 $\pm 4,30$	9,75 $\pm 0,01$				5,76	9,18 $\pm 1,00$	8,45 $\pm 1,44$	11,3
Cr	9,84 $\pm 0,45$	54,60 $\pm 30,00$	6,68 $\pm 0,06$	14,60 $\pm 0,91$	41,76 $\pm 30,00$	14,60 $\pm 0,13$	6,41	3,63 $\pm 2,60$	10,48 $\pm 8,40$	15,6

Экспериментальные величины концентрации электронов зоны проводимости сопоставлены с расчетными значениями. Показано, что выбранная для расчета модель свободного электронного газа, хорошо зарекомендовавшая себя в таких металлах как магний, алюминий, медь, цинк, индий, олово, свинец, висмут для металлов переходной группы с 3d электронной оболочкой малоприспособна. Из экспериментальных данных следует, что все исследованные металлы, кроме хрома (железо, никель, ванадий), отдают в зону проводимости всего лишь по одному электрону, в то время как их внешняя электронная оболочка содержит по два S-электрона (их конфигурация $3d^n4S^2$). Концентрации электронов в зоне проводимости и энергии Ферми для этих металлов соответственно составляют $7,4 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ($E_F = 6,45 \text{ эВ}$) для железа, $15,6 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ($E_F = 10,48 \text{ эВ}$) для хрома, $9,1 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ($E_F = 7,29 \text{ эВ}$) для никеля и $8,0 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ($E_F = 6,7 \text{ эВ}$) для ванадия. Вероятно, для этих металлов часть валентных электронов идет на образование химических связей, чем и объясняется присущая им высокая температура плавления (а также высокие механические свойства). Для хрома ($3d^54S^1$) экспериментально измеренная концентрация электронов в зоне проводимости значительно больше (в $1,6 \div 2$ раза) расчетного значения, выполненного в предположении, что хром может отдавать в зону проводимости только один электрон. Этот вопрос требует дальнейших исследований и может быть связан с тем что, электронная конфигурация хрома, входящего в состав кристалла, отличается от электронной конфигурации изолированного атома хрома, например ($3d^44S^2$).

Проведенные сопоставления измеренных и расчетных концентраций электронов в зоне проводимости дают основания полагать, что позитронная спектроскопия может быть с успехом применена и для исследования внутренних связей в металлах.

Определение размера дефектов и их концентрации

Существуют модели, позволяющие сопоставлять параметры аннигиляционных спектров (ВРАФ и УРАФ) со средним размером пор и их концентрацией.

Время жизни позитронов в веществе зависит от пространственной плотности электронов в месте аннигиляции позитронов. При наличии свободного объема (поры) в веществе время жизни позитронов определяется размером поры. Обычно для расчетов используется простая модель [24-26]: позитрон находится в сферической яме радиусом R_0 с бесконечно высоким потенциальным барьером. При этом скорость λ его аннигиляции в приграничном слое ΔR зависит от радиуса свободного объема поры R

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 - \frac{R}{R_0} + (2\pi)^{-1} \sin\left(\frac{2\pi R}{R_0}\right) \right], \text{нс}^{-1}, \quad (15)$$

где $R = R_0 - \Delta R$, а λ_0 - скорость аннигиляции в бездефектной части вещества.

Анализ аннигиляции позитронов в материалах с известными значениями радиусов пор в молекулярных твердых телах и цеолитах показал, что величина $\Delta R = R_0 - R = 1,66 \text{ \AA}$. Вообще говоря, значение величины ΔR зависит от природы вещества. Поэтому уравнение (15) возможно применять лишь для оценок размеров радиусов пор.

Размер пор можно также найти, используя только данные УРАФ.

В рамках рассматриваемой модели энергия частицы E в основном состоянии в потенциальной яме, моделирующей пору, дается выражением

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mR^2}, \quad (16)$$

где m - масса частицы.

В случае позитрона его энергия будет связана с размером поры соотношением

$$E_{eV} = \frac{37,7}{R_0^2}, \quad (17)$$

где 37,7 - переводной множитель, R – в ангстремах.

Из параметров аннигиляционных спектров УРАФ можно определить энергию позитрона, аннигилирующего в поре, и тем самым оценить размер поры. Поскольку

позитрон перед аннигиляцией успевае практически термализоваться, то измеряемая энергия аннигилирующей позитрон-электронной пары в основном будет определяться энергией электрона.

Рассмотрение кинетической схемы гибели позитронов в среде позволяет по параметрам аннигиляционных спектров определять средние величины концентрации дефектов.

Экспериментальный спектр углового распределения фотонов представляет собой суперпозицию отдельных кривых, характеризующих аннигиляцию позитронов в бездефектной области и в дефектах разных типов [13-15].

Для определения средней величины концентрации дефектов и их размеров по основным характеристикам аннигиляционных спектров в случае, когда в образце имеется два типа дефектов ($N = 2$), можно написать следующие уравнения для скорости захвата позитронов в вакансию и в кластер [10,13]:

$$k_{d1}N_{d1} = \frac{I_1}{1 - I_1 - I_2} \lambda_0, \quad k_{d2}N_{d2} = \frac{I_2}{1 - I_1 - I_2} \lambda_0 \quad (18)$$

$$I_1 = \frac{k_{d1}N_{d1}}{\lambda_0 + k_{d1}N_{d1} + k_{d2}N_{d2}}, \quad I_2 = \frac{k_{d2}N_{d2}}{\lambda_0 + k_{d1}N_{d1} + k_{d2}N_{d2}},$$

где I_i – вероятность аннигиляции позитронов в областях, соответствующих дефектам i -го типа, λ_0 – скорость аннигиляции позитронов в бездефектной области, k_d – константа захвата позитронов дефектами, N_d – концентрация дефектов.

Среднее значение константы захвата позитронов дефектами можно записать в виде

$$k_d = \sigma \cdot \nu = 4 \cdot \pi \cdot D_+ \cdot R_d \quad (19)$$

Здесь D_+ – коэффициент диффузии позитронов, R_d – средний радиус дефектов (пор), σ – сечение захвата дефектами позитрона, ν – скорость термализованного позитрона.

Если имеются образцы с разной концентрацией дефектов одного типа, то можно найти разностный спектр

$$\Delta I = I_1'' - I_1'$$

$$\Delta I = \lambda_0 k_d (N_{d1}'' - N_{d1}') / (\lambda_0 + k_d N_{d1}'' + k_d N_{d2}'') (\lambda_0 + k_d N_{d1}' + k_d N_{d2}') \quad (20)$$

В частном случае дефектов одного типа и изначально бездефектного образца $N_d'' \gg N_d'$

$$\Delta I = k_d N_d'' / (\lambda_0 + k_d N_d'') \quad (21)$$

Здесь ΔI – экспериментально измеряемая величина методом УРАФ, λ_0 – скорость аннигиляции позитронов в объеме материала, измеряется методом ВРАФ.

Используя приведенные выражения, можно оценивать радиусы свободных объемов в пористых системах, дефектных материалах по параметрам экспериментально измеренных спектров УРАФ и ВРАФ.

Рассмотрим, для примера, сталь с низким содержанием фосфора (LP).

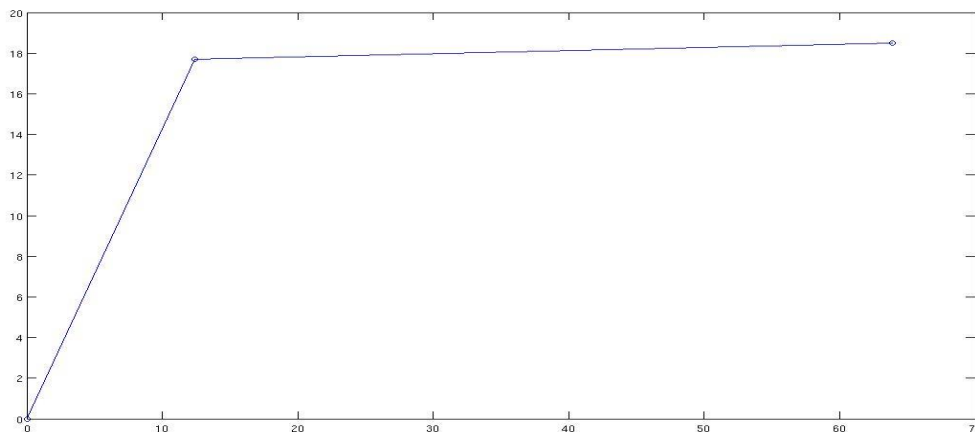
Результаты математической обработки экспериментальных спектров УРАФ показывают, что во всех образцах сталей LP имеются высокоинтенсивные гауссовы компоненты с интенсивностями $I_{g1} \sim (34-63)\%$, $I_{g2} \sim (20-55)\%$ и энергиями $E_{g1} \sim (6-9)$ эВ и $E_{g2} \sim (15-24)$ эВ и параболическая компонента с интенсивностью $I_p \sim (4-15)\%$ и энергией Ферми $E_f \sim (7-9)$ эВ. По нашему мнению высокоинтенсивные гауссовы компоненты обусловлены аннигиляцией позитронов, захваченных вакансионными дефектами, а параболическая компонента обусловлена аннигиляцией позитронов на делокализованных электронах проводимости (Ферми-газе объектов). Обращает на себя внимание низкая интенсивность параболической компоненты (таблицы 3-5). Интенсивность этой компоненты для всех исследованных образцов сталей не превышает

15 %. и уменьшается с ростом флюенса нейтронов. Этот эффект, по-видимому, связан с тем обстоятельством, что большая часть позитронов захватывается и аннигилирует в дефектах. Так в работе [18, 19], выполненной методом ВРАФ, показано, что при флюенсе нейтронов $3,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ в аналогичных сталях практически все позитроны захватываются дефектами. Увеличение концентрации позитрончувствительных дефектов с ростом флюенса электронов в сплавах Fe-Ni, Fe-Ni-Al, Fe-Ni-Si наблюдалось также по изменению S-параметра (доплеровского уширения аннигиляционной линии) в работе [27]. В работе [28] показано, что S-параметр характеризует концентрацию вакансионных кластеров малых размеров.

Экспериментально определенная концентрация электронов в зоне проводимости для всех исследованных образцов сплавов уменьшается с ростом флюенса нейтронов (см. [таблицы 3-5](#)). Даже после отжига при $475 \text{ }^\circ\text{C}$ концентрация делокализованных электронов не возвращается к исходному состоянию. Подобные результаты для чистого железа наблюдались в работе [23], где концентрация электронов проводимости уменьшалась с дозой облучения. По нашему мнению, такое уменьшение концентрации электронов при облучении сплавов обусловлено увеличением межкристаллитных ковалентных связей на границе зерен и формированием упорядоченных структур из примесных атомов. Наблюдается корреляция между характером изменения концентрации делокализованных электронов (рис. 4) и изменениями температуры вязко-хрупкого разрушения материала образцов [6, 7].

Таким образом, появляется возможность исследования методами ПАС внутренних связей в металлах.

$$\frac{N_p^0 - N_p}{N_p^0} \cdot 100\%$$



Флюенс нейтронов 10^{18} н/см^2

Рис. 4. Образцы стали (MP) со средним содержанием фосфора

Здесь N_p^0 и N_p – соответственно концентрация электронов в необлученных и облученных образцах сталей.

На рис. 4 представлено относительное изменение концентрации электронов в зоне проводимости в зависимости от флюенса нейтронов для стали (MP) со средним содержанием фосфора. Для сталей с низким (LP) и высоким (HP) содержанием фосфора характер зависимости аналогичный (см. [таблицы 3-5](#)).

Как уже говорилось выше, по параметрам аннигиляционных спектров УРАФ можно определить энергию позитрона, аннигилирующего в поре, и тем самым оценить размер поры.

Из данных [таблиц 6 и 7](#) видно, что экспериментально измеренные значения E_{g1}, E_{g2} образцов стали, железа, хрома и никеля сопоставимы со значениями энергий связи $E_1 = U_1$ и $E_2 = U_2$ внешних валентных электронов атомов элементов, входящих в состав стали (табл. 7).

Таблица 7. Химический состав образцов стали LP и потенциалы ионизации элементов, входящих в состав стали

Название образца	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V
Содержание, %	~ 97	0,04	0,04	1,12	0,027	0,013	1,42	0,13	0,49	0,16	0,19
U_1 , эВ	7,9	11,3	8,15	7,43	10,56	10,35	6,76	7,63	7,13	7,72	6,74
U_2 , эВ	16,2	24,4	16,34	15,64	19,65	23,4	16,49	18,15	15,72	20,29	14,65

E_{g1} – необлученные образцы сталей ~ 5.86-6.91 [эВ] (табл. 3-5)

E_{g2} – необлученные образцы сталей ~ 15.6-18.6 [эВ] (табл. 3-5)

Назовем эти центры аннигиляции позитронов с параметрами I_{g1}, E_{g1} центрами первого рода. Отличие величины E_{g1} от значения $E_1 = U_1$ атомов Fe и Cr, по-видимому, обусловлено уменьшением $E_1 = U_1$ в кристалле (сплаве) по сравнению со значением $E_1 = U_1$ электрона свободных атомов Fe и других атомов за счет образования химических связей с другими элементами сплава. В свою очередь, значения E_{g2} для образцов стали, Fe и Cr по своим значениям ближе всего к значениям энергии связи $E_2 = U_2$ внешних электронов положительно заряженных ионов атомов Fe и других элементов, входящих в состав стали (таблица 7). Назовем эти центры аннигиляции позитронов с параметрами I_{g2}, E_{g2} центрами второго рода. Из данных табл. 3-5 следует, что эти центры аннигиляции первого и второго рода при облучении и отжиге претерпевают значительные трансформации.

Будем считать центрами аннигиляции первого рода поры в тройном стыке кристаллитов и дислокации (либо комплексы вакансий), декорированные атомами железа и примесей. Аннигиляция позитронов из этих состояний дает компоненту $I_{g1}(E_{g1})$. Центрами захвата второго рода могут служить вакансии на границе раздела кристаллитов и радиационно-индуцированные вакансии Fe и их комплексы. Из экспериментальных данных (таблицы 3-5) следует, что при отжиге происходит преимущественно трансформация радиационно-индуцированной части центров захвата второго рода в центры захвата с более глубокими позитронными уровнями. В такой модели с ростом флюенса нейтронов увеличивается концентрация радиационно-индуцированных вакансионных дефектов и, как следствие, увеличивается захват позитронов этими дефектами и, соответственно, уменьшается доля позитронов, аннигилирующих со свободными электронами и в дефектах первого рода (см. таблицы 3-5).

При этом аннигиляция позитронов протекает в основном на внешних (валентных) электронах атома железа и заряженного иона Fe^+ , так как $E_{g1} \rightarrow U_1, E_{g2} \rightarrow U_2$.

Таким образом, по экспериментально определенным энергиям E_{g1} и E_{g2} (см. таблицы 3-5) можно также найти состав и радиусы нанобъектов (пор, вакансий, зерен и включений второй фазы – нанокластеров и возможно дислокаций, декорированных различными примесями и т.д.), используя только данные УРАФ [29-31]. Для этого приведем выражение, связывающее энергию аннигилирующей электрон-позитронной пары с полной шириной на полувысоте соответствующей гауссовой компоненты спектра УРАФ

$$E_{gi} = 6,9 \cdot 10^{-2} \cdot \Gamma_{gi}^2 \quad (22)$$

Здесь E – энергия в эВ, а Γ_g – полная ширина кривой УРАФ на полувысоте в мрад. Так для образцов сплава LP (таблица 3) рассчитанные по этой формуле значения средних энергий аннигилирующих электрон-позитронных пар оказались равными $E_{g1} = 6,91, 6,09, 5,52, 9,23$ эВ и $E_{g2} = 18,6, 18,1, 15,5, 24,4$ эВ. Табличные значения энергий электронов (табл. 7) внешних оболочек атомов железа и иона железа составляют величины 7,89 и

16,19 эВ, а для хрома эти же величины соответственно равны 6,76 и 16,49 эВ. Как видим, значения величин энергий E_{gi} , $E(Fe)$ и $E(Fe^+)$ близки друг другу. Таким образом, можно полагать, что позитроны аннигилируют в основном на внешних валентных электронах атомов железа (хрома) «стенки» вакансий и комплексов вакансий. В этом случае, разность величин $E - E(Fe)$ в эВ обусловлена вкладом энергии позитрона, находящегося в вакансиях, в энергию аннигилирующих электрон-позитронных пар. Для оценки размера вакансий можно использовать выражения вида

$$R_{sp} = \left(\frac{37,7}{E - E(Fe)} \right)^{1/2}, \quad R_{sp} = \left(\frac{37,7}{E - E(Fe^+)} \right)^{1/2} \quad (23)$$

Здесь величины имеют размерности R_{sp} в Å, E в эВ. Определим размеры центров захвата второго рода, используя параметры ионов железа $E = E_{g2} - E(Fe^+)$ эВ. Для $E_{g2} = 18,6$ эВ и $E(Fe^+) = 16,19$ эВ получим размер пор 4 Å. Значение $E(Fe^+)$ для всех исследованных образцов сталей (LP, MP, HP) меняется от 15,5 до 24,4 эВ, а размер дефектов, соответственно, от 5 до 2 Å.

Из выражения (21) можно получить связь между скоростью захвата $k_d N_d$ центрами второго рода и интенсивностью компоненты I_{g2}

$$k_d N_d \cong \lambda_0 \Delta I \cong \Delta I / \tau_0, \text{ с}^{-1} \quad (24)$$

Здесь ΔI – разность между интенсивностями гауссовых компонент I_{gi} (Irradiated), облученных образцов стали, и I_{gi} (Not irradiated) исходных необлученных образцов стали в спектрах УРАФ, k_d – константа захвата позитронов дефектами, а N_d – концентрация дефектов.

Оценим значение $k_d N_d$ для значения $\Delta I_{g2} = 0,08$ (см. табл. 3) и значения $\tau_0 = (1,10 \pm 0,05) \cdot 10^{-10}$ с [18,19] для данной стали. С этим значением ΔI_g получаем $k_d N_d \cong 0,08 / 1,10 \cdot 10^{-10} = 7,3 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$.

Величина скорости захвата $k_d N_d$ в свою очередь может быть определена на основе известного выражения

$$k_d N_d = \sigma \cdot \nu \cdot N_d, \text{ с}^{-1} \quad (25)$$

Здесь σ – сечение захвата дефектами позитрона; ν – скорость термализованного позитрона; N_d – средняя концентрация дефектов (в дефектной области кристалла). Средняя тепловая скорость позитрона при комнатной температуре $T = 293\text{K}$ оценивалась по формуле $\nu = (8k_0 T / \pi m_+^*)^{1/2} \approx 1,05 \cdot 10^7$ см/с, где k_0 – постоянная Больцмана, $m_+^* \approx m_0$ – эффективная масса позитрона, $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г – масса свободного позитрона. Предполагая, что сечение захвата позитронов центрами захвата примерно равно среднему значению геометрического сечения дефекта, получим $\sigma \approx \pi \cdot R_d^2 = 3,14 \cdot 0,16 \cdot 10^{-14} \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ (приняли, что $R_d \approx 0,4$ нм). Используя определенные выше значения $R_d \approx 0,4 \cdot 10^{-7}$ см, k_d и ν , можно оценить среднее значение концентрации центров захвата позитронов в облученных образцах стали $N_d = \lambda_0 \Delta I / \sigma \cdot \nu = 7,3 \cdot 10^8 / 5 \cdot 10^{-15} \cdot 10^7 \approx 1,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При использовании данных [18, 19] $\Delta I_2 = 0,06$, $\tau_0 = 1,1 \cdot 10^{-10}$ с и радиусе вакансий $R_d \approx 0,25$ нм (радиус вакансий из данных ВРАФ) получим значение $k_d N_d \cong 0,06 / 1,10 \cdot 10^{-10} = 5,5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ и концентрацию дефектов $N_d = k_d N_d / \sigma \cdot \nu = 5,5 \cdot 10^8 / 2 \cdot 10^{-15} \cdot 10^7 \approx 2,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Заклучение

Проведены исследования корпусных сталей, используемых в действующих реакторах ВВЭР–440. В исследованных образцах сталей выявлены вакансионные дефекты, в том числе вызванные нейтронным облучением, и определены их размеры. Показано, что метод позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) является одним из эффективных методов определения размеров нанообъектов (вакансий, вакансионных кластеров), свободных объемов пор, полостей, пустот, их концентраций и химического состава в месте аннигиляции позитронов в дефектных материалах.

Установлено, что позитронная спектроскопия может с успехом применяться для исследования внутренних связей в металлах и, в частности, для исследования границ раздела кристаллитов.

Примечания:

1. Slugen V., Segers D., de Bakker P.M.A., de Graveb E., Magula V., Hoecke T. van and B. van Waeyenberge // *Journal of Nuclear Materials*, Volume 274, Issue 3, September 1999, p.273-286;
2. Slugen V., Kogel G., Sperr P., Triftshausen W. // *Journal of Nuclear Materials*. 302 (2002) 89–95.
3. Debarberis L., Kryukov A., Erak D., Kevorkyan Yu. and D. Zhurko // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 81, Issue 8, August 2004, Pages 695-701.
4. Nishiyama Y., Onizawa K., Suzuki M., Anderegg J.W., Nagai Y., Toyama T., Hasegawa M. and J. Kameda // *Acta Materialia*, Volume 56, Issue 16, September 2008, Pages 4510-4521.
5. Rogozkin S., et al. // *The effect of post-irradiation annealing on VVER-440 RPV materials mechanical properties and nano-structure under re-irradiation*, proceedings of PVP2009, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic.
6. Chernobaeva A., Shtrombah J., Krjukov A., Erak D., Platonov P., Nikolaev J., Krasikov E., Debarberis L., Kohopaa Yu., Valo M., Vodenicharov S. and T. Kamenove. *Material characterization and selection for the international research project “PRIMAVERA”*. // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 84, Issue 3, March 2007, Pages 151-158.
7. Zabusov, E. Krasikov, M. Kozodaev, A. Suvorov, P. Pareige, B. Radiguet., “Redistribution of impurity and alloying elements in VVER-440 reactor pressure vessel steel due to operating factors”, *Physics of radiation damage and radiation material science*, N 3 (83), 2003, pp. 66-72.
8. Zeman A., et al. // *Journal of Nuclear Materials*, Volume 360, Issue 3, 1 March 2007, p. 272-281.
9. Krsjak V., et al. // *Applied Surface Science*; Volume 255, Issue 1, 31 October 2008, Pages 153-156.
10. Lambrecht M., Almazouzi A. // *Journal of Nuclear Materials*, Volume 385, Issue 2, 31 March 2009, Pages 334-338.
11. Druzhkov A.P., Perminov D.A. //Chapter 5 in *Nuclear Materials Research Developments*. Editor: J.E.Keister ISDN 1-60021-432-0, 2007, Nova Science Publishers, Inc.
12. Puska M.J. and R.M. Nieminen // *Reviews of Modern Physics*, vol.66, № 3, July 1994, p. 841-893.
13. Grafutin V.I. and E.P. Prokopev // *Physics - Uspekhi* 45 (1) 59 - 74 (2002), p.63;
14. Grafutin V.I. et al. // *Phys. Solid State* 40 549 (1998).
15. Grafutin V.I. et al. // *Phys. Solid State* 41 843 (1999).
16. Puska M.J., Nieminen R.M. *Defect spectroscopy with positrons a general calculational method*.// *J.Phys. F: Metal Phys.* 1983. V.13. №2. P.333-346.
17. Slugen V. // *What Kind of Information we can Obtain from Positron Annihilation Spectroscopy*, European Commission, Joint Research Centre, EUR 22468 EN, 2006.
18. Kocik J., Keilova E., Cizek J., Prochazka I. // *Journal of Nuclear Materials* 303 (2002) 52–64.
19. Cizek J., Becvar F., Prochazka I. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics research A* 450 (2000) 325-337.
20. Гусев А.И. // *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*, Москва, Физматлит, 2009, С. 415.
21. Schaefer H.-E. *Investigation of termal equilibrium vacancies in metals by positron annihilation*. // *Phys.Stat.Sol.(a)*.1987.V102. №1. P. 47-65.

22. Бритков О.М., Гаврилов С.А., Графутин В.И., Калугин В.В., Илюхина О.В., Мясищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Исследование пористого кремния методом позитронной аннигиляционной спектроскопии // Химия высоких энергий. 2007. Т.41. №1. С. 1-6.
23. Eldrup M. and B.N. Singh // Investigations of Void Formation in Neutron Irradiated Iron and F82H Steel, Risø report R-1241(EN), ISBN 87-550-2824-1, (2001).
24. Tao S. J. // J. Chem. Phys. 56 (1972) 5499.
25. Eldrup M., Lightbody D., Sherwood J. N. // Chem. Phys. 63 (1981) 51.
26. Deng Q., Jean Y. // Macromolecules 26 30 (1993).
27. Druzhkov A.P., Perminov D.A., Davletshin A.E. // Journal of Nuclear Materials, 384 (2009) 56-60.
28. Brandt W. // Appl. Phys. 5.(1974) 1.
29. Графутин В.И., Илюхина О.В., Мясищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В. Позитроника нанообъектов в пористых и дефектных системах на основе кремния и кварца. // Украинский физический журнал. 2009. Т.54. №5. С. 443-453.
30. Chaplygin YA, Gavrilo SA, Grafutin VI, Svetlov-Prokopiev E, and Timoshenkov SP. Positronics and nanotechnologies: possibilities of studying nano-objects in technically important materials and nanomaterials. // Proc. IMechE. Part N: J. Nanoengineering and Nanosystems. 2009. Vol. 221. P. 125-132.
31. Chaplygin Yu.A., Grafutin V.I., Svetlov-Prokopiev E.P., Timoshenkov S.P. Positronics and Nanotechnologies: Possibilities of Studying Nano-objects in Technically Important Materials and Nanomaterials. // In Book: Advances in Nanotechnology. Volume 1. Editors: E. J. Chen and N. Peng. 2009.

References:

- Slugen V., Segers D., de Bakker P.M.A., de Grave E., Magula V., Hoecke T. van and B. van Waeyenberge // Journal of Nuclear Materials, Volume 274, Issue 3, September 1999, p.273-286;
- Slugen V., Kogel G., Sperr P., Triftshauser W. // Journal of Nuclear Materials. 302 (2002) 89-95.
- Debarberis L., Kryukov A., Erak D., Kevorkyan Yu. and D. Zhurko // International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 81, Issue 8, August 2004, Pages 695-701.
- Nishiyama Y., Onizawa K., Suzuki M., Anderegg J.W., Nagai Y., Toyama T., Hasegawa M. and J. Kameda // Acta Materialia, Volume 56, Issue 16, September 2008, Pages 4510-4521.
- Rogozkin S., et al. // The effect of post-irradiation annealing on VVER-440 RPV materials mechanical properties and nano-structure under re-irradiation, proceedings of PVP2009, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic.
- Chernobaeva A., Shtrombah J., Krjukov A., Erak D., Platonov P., Nikolaev J., Krasikov E., Debarberis L., Kohopaa Yu., Valo M., Vodenicharov S. and T. Kamenove. Material characterization and selection for the international research project "PRIMAVERA". // International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 84, Issue 3, March 2007, Pages 151-158.
- Zabusov, E. Krasikov, M. Kozodaev, A. Suvorov, P. Pareige, B. Radiguet., "Redistribution of impurity and alloying elements in VVER-440 reactor pressure vessel steel due to operating factors", Physics of radiation damage and radiation material science, N 3 (83), 2003, pp. 66-72.
- Zeman A., et al. // Journal of Nuclear Materials, Volume 360, Issue 3, 1 March 2007, p. 272-281.
- Krsjak V., et al. // Applied Surface Science; Volume 255, Issue 1, 31 October 2008, Pages 153-156.
- Lambrecht M., Almazouzi A. // Journal of Nuclear Materials, Volume 385, Issue 2, 31 March 2009, Pages 334-338.
- Druzhkov A.P., Perminov D.A. //Chapter 5 in Nuclear Materials Research Developments. Editor: J.E.Keister ISDN 1-60021-432-0, 2007, Nova Science Publishers, Inc.
- Puska M.J. and R.M. Nieminen // Reviews of Modern Physics, vol.66, № 3, July 1994, p. 841-893.
- Grafutin V.I. and E.P. Prokopiev // Physics - Uspekhi 45 (1) 59 - 74 (2002), p.63;
- Grafutin V.I. et al. // Phys. Solid State 40 549 (1998).
- Grafutin V.I. et al. // Phys. Solid State 41 843 (1999).

16. Puska M.J., Nieminen R.M. Defect spectroscopy with positrons a general calculational method. // *J.Phys. F: Metal Phys.* 1983. V.13. №2. P.333-346.
17. Slugen V. // *What Kind of Information we can Obtain from Positron Annihilation Spectroscopy*, European Commission, Joint Research Centre, EUR 22468 EN, 2006.
18. Kocik J., Keilova E., Cizek J., Prochazka I. // *Journal of Nuclear Materials* 303 (2002) 52-64.
19. Cizek J., Becvar F., Prochazka I. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics research A* 450 (2000) 325-337.
20. Gusev A.I. // *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii*, Moskva, Fizmatlit, 2009, S. 415.
21. Schaefer H.-E. Investigation of thermal equilibrium vacancies in metals by positron annihilation. // *Phys.Stat.Sol.(a)*.1987.V102. №1. P. 47-65.
22. Britkov O.M., Gavrilo S.A., Grafutin V.I., Kalugin V.V., Ilyukhina O.V., Myasishcheva G.G., Prokop'ev E.P., Timoshenkov S.P., Funtikov Yu.V. Issledovanie poristogo kremniya metodom pozitronnoi annigilyatsionnoi spektroskopii // *Khimiya vysokikh energii*. 2007. T.41. №1. S. 1-6.
23. Eldrup M. and B.N. Singh // *Investigations of Void Formation in Neutron Irradiated Iron and F82H Steel*, Risø report R-1241(EN), ISBN 87-550-2824-1, (2001).
24. Tao S. J. // *J. Chem. Phys.* 56 (1972) 5499.
25. Eldrup M., Lightbody D., Sherwood J. N. // *Chem. Phys.* 63 (1981) 51.
26. Deng Q., Jean Y. // *Macromolecules* 26 30 (1993).
27. Druzhkov A.P., Perminov D.A., Davletshin A.E. // *Journal of Nuclear Materials*, 384 (2009) 56-60.
28. Brandt W. // *Appl. Phys.* 5.(1974) 1.
29. Grafutin V.I., Ilyukhina O.V., Myasishcheva G.G., Prokop'ev E.P., Timoshenkov S.P., Funtikov Yu.V. Pozitronika nanoob"ektov v poristyykh i defektnyykh sistemakh na osnove kremniya i kvartsa. // *Ukrainskii fizicheskii zhurnal*. 2009. T.54. №5. S. 443-453.
30. Chaplygin YA, Gavrilo SA, Grafutin VI, Svetlov-Prokopiev E, and Timoshenkov SP. Positronics and nanotechnologies: possibilities of studying nano-objects in technically important materials and nanomaterials. // *Proc. IMechE. Part N: J. Nanoengineering and Nanosystems*. 2009. Vol. 221. P. 125-132.
31. Chaplygin Yu.A., Grafutin V.I., Svetlov-Prokopiev E.P., Timoshenkov S.P. Positronics and Nanotechnologies: Possibilities of Studying Nano-objects in Technically Important Materials and Nanomaterials. // *In Book: Advances in Nanotechnology. Volume 1. Editors: E. J. Chen and N. Peng*. 2009.

УДК 621.315

Применение методов позитронной аннигиляционной спектроскопии в ядерных технологиях

1. Исследования конструкционных материалов активной зоны реакторов методом углового распределения аннигиляционных фотонов (метод УРАФ)

Виктор Иванович Графутин^a, Владимир Аркадьевич Илюхин^a,
Ольга Владимировна Илюхина^a, Евгений Петрович Прокопьев^{a,*},
Геннадий Иванович Савельев^a, Николай Олегович Хмелевский^a,
Юрий Васильевич Фунтиков^a

^aНИЦ «Курчатовский институт», ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»
им. А.И. Алиханова, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор
Адреса электронной почты: eprokopiev@mail.ru (Е.П. Прокопьев)

Аннотация. Методом позитронной аннигиляционной спектроскопии (метод УРАФ) проведены экспериментальные исследования сталей, применяемых в атомной промышленности. Обработка экспериментальных результатов и сопоставление их с литературными данными позволила выявить вакансионные дефекты, в том числе и вызванные нейтронным облучением, и определить их размеры.

Ключевые слова: спектроскопия, ядерные технологии, позитроны, метод УРАФ.

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*

Published in the Russian Federation
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
 Has been issued since 2015.
 ISSN: 2410-9347
 Vol. 1, Is. 1, pp. 32-44, 2015

DOI: 10.13187/rjar.2015.1.32
www.ejournal28.com



UDC 621.315

Antimatter: Synthesis, Properties and Applications

1. General Principles of Interaction of Matter and Antimatter. Non-Relativistic Theory

Evgeny P. Prokopiev ^{a, *}

Russian Research Center "Kurchatov Institute", Institute for Theoretical and Experimental Physics, Russian Federation

Abstract

In the non-relativistic approximation for the interaction of atoms with antiatoms in extremely low-density gas (e.g., space plasmas) analyzed the problem of the interaction of matter and antimatter. The article discusses the restructuring and annihilation in atom-anti-nuclear interactions, as well as the stationary state of the atom systems-antiatom. The article shows various approximate methods for solving the stationary problem, for example, methods LCAO MO SCF and Hitler London.

Keywords: anti-matter, synthesis, properties, the theory of non-relativity.

Введение

Проблемы освоения ближнего и дальнего космоса и межзвездных перелетов неразрывно связаны с современными научно-техническими достижениями [1-7]. Несомненный интерес [8-48] представляет проблема взаимодействия материи и антиматерии вообще и нерелятивистская проблема взаимодействия вещества и антивещества в частности. Действительно, недавние наблюдения [8-10] показали, что в центре нашей Галактики имеется объект (или вернее область) с протяженностью порядка 10^{13} км, в состав которого входит много атомов позитрония и позитронов. В такой области при наличии античастиц возможно образование антиатомов и даже антимолекул, состоящих из антинуклонов и позитронов а также смешанных атомных и молекулярных объектов, в состав которых входят частицы и античастицы (позитроны, электроны, нуклоны и антинуклоны и другие массивные античастицы и частицы).

Обсуждение

Заметим при этом, что космологические аспекты существования в нашей материнской Вселенной антиматерии уже неоднократно осуждались и являются предметом пристального внимания в современной науке [1-8, 24, 27, 28, 38-43, 47, 48]. Интересными являются взаимодействия античастиц с веществом в пузырьковых камерах, служащих их детекторами [9]. Обсуждаются также возможности использования антивещества как наиболее эффективного источника энергии [11, 17, 20-23, 25, 29-33, 35-37, 40-46].

* Corresponding author
 E-mail addresses: eprokopiev@mail.ru (E.P. Prokopiev)

В основополагающих работах Моргана и Хьюза [49, 50] детально проанализированы вопросы взаимодействия плазмы вещества и антивещества при высоких температурах. Рассмотрено влияние кулоновского взаимодействия на процессы прямой аннигиляции, радиационных захватов и столкновений, приводящих к перестройке атомных систем. Установлено, что эти процессы приводят к появлению связанных состояний частиц и античастиц типа Ферми-Теллера [51], из которых идет интенсивная аннигиляция. Сечение процесса перестройки значительно больше сечения прямой аннигиляции и должно учитываться при расчетах общей скорости аннигиляции в широком интервале кинетических энергий.

Результаты

Ниже рассмотрен случай очень низких температур в чрезвычайно разреженном газе, когда вещество и антивещество практически не ионизовано. В этом случае атом-антиатомные столкновения также приводят к ядерно-антиядерным связанным состояниям, способствующих процессу аннигиляции [14]. При этом случай взаимодействия n - электронных и m - позитронных атомов и антиатомов, описывается гамильтонианом

$$H = H_0 + V, \quad (1)$$

где H_0 - гамильтониан невозмущенной системы с фиксированным межъядерным расстоянием, V - гамильтониан атом-антиатомного взаимодействия. Пусть заряд ядра есть Ze , а антиядра - $\bar{Z}e$; тогда гамильтониан невозмущенной системы $A - \bar{A}$ в нерелятивистском приближении равен

$$V = -\frac{Z \cdot \bar{Z}}{R} + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{Z}}{|\bar{R} + \vec{r}_i|} + \sum_{j=1}^m \frac{Z}{|-\bar{R} + \vec{r}_j|} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{1}{|\bar{R} + \vec{r} - \vec{r}_j|}$$

$$H_0 = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{Z}{r_{ai}} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_k|} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \nabla_j^2 - \sum_{j=1}^m \frac{\bar{Z}}{r_{bj}} + \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{l=j+1}^m \frac{1}{|\vec{r}_j - \vec{r}_l|}, \quad (2)$$

$$V = -\frac{Z \cdot \bar{Z}}{R} + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{Z}}{|\bar{R} + \vec{r}_i|} + \sum_{j=1}^m \frac{Z}{|-\bar{R} + \vec{r}_j|} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{1}{|\bar{R} + \vec{r} - \vec{r}_j|} \quad (3)$$

Здесь \vec{r}_i - радиус-вектор электрона относительно ядра, а \vec{r}_j - радиус-вектор позитрона относительно антиядра, \bar{R} - радиус-вектор от антиядра к ядру. В (2) и (3) и в дальнейшем всюду используются ат. ед.

Невозмущенные значения энергии E_k и собственные функции Ψ_k являются решением уравнения Шредингера

$$(H_0 - E_k)\Psi_k = 0 \quad (4)$$

Так как V равно нулю при $R \rightarrow \infty$, то общая энергия системы $A - \bar{A}$ $E(R)$ в этом случае есть E_p для состояния p и вследствие этого межатомная потенциальная энергия

$$V_p(R) = E(R) - E_p \quad (5)$$

На больших расстояниях $R \geq 10a_0$ (a_0 - боровский радиус) V рассматривается как малое возмущение [49, 50]. В потенциал взаимодействия $V_p(R)$ вносят основной вклад дипольные и мультипольные члены, отвечающие электростатическому взаимодействию $A - \bar{A}$.

При $R \rightarrow 0$ естественно $V_p(R) = Z \cdot \bar{Z} / R$, то есть может образоваться связанная ядерно-антиядерная система. При этом лептоны уходят из связанных состояний в атоме и антиатоме. Существует критическое расстояние $R = R_c$ между ядром и антиядром, при котором начинается спонтанная ионизация системы. Это расстояние может быть определено при решении полной задачи

$$(H_0 + V)\Psi = E\Psi \quad (6)$$

с гамильтонианом (1). Для решения задачи используются различные приближенные методы: метод Гайтлера-Лондона для систем с малым числом лептонов [49, 50, 52] и неограниченный метод Хартри-Фока в схеме МО ЛКАО для многолептонных систем [53]. В этом случае гамильтониан системы $A - \bar{A}$ записывается в виде

$$H = \sum_{i=1}^n f_i + \sum_{j=1}^m \bar{f}_j + \sum_{i<j}^{m+n} g_{ij}, \quad (7)$$

где

$$f_i = -\frac{1}{2} \nabla_i^2 - \frac{Z_a}{r_{ai}} + \frac{\bar{Z}_b}{\bar{r}_{bi}}, \quad (8)$$

$$\bar{f}_j = -\frac{1}{2} \nabla_j^2 + \frac{Z_a}{r_{aj}} - \frac{\bar{Z}_b}{\bar{r}_{bj}}, \quad (9)$$

Здесь f_i и \bar{f}_j - одноэлектронные и однопозитронные операторы. Последний член в (7) соответствует межлептонному взаимодействию, где $g_i = r_{ij}^{-1}$ для $i, j \leq n$, в то время как при $i, j > n$ $g_i = -r_{ij}^{-1}$.

Фермионные электронная Φ и позитронная $\bar{\Phi}$ волновые функции записываются в виде

$$\Phi = (n!)^{-1/2} \|\varphi_i(r_k, \alpha_k)\|_{i,k=1,2,\dots,n}, \quad (10)$$

$$\bar{\Phi} = (m!)^{-1/2} \|\bar{\varphi}_j(r_l, \alpha_l)\|_{j,l=1,2,\dots,m}, \quad (11)$$

где φ_i и $\bar{\varphi}_j$ - ортонормированные спин-орбитали.

Так как обменное взаимодействие между электронами и позитронами в нерелятивистском приближении отсутствует, то общая волновая функция записывается как $\Psi = \Phi \cdot \bar{\Phi}$. Вариационный принцип заключается в минимизации функционала

$$E - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \lambda_{ik} S_{ik} - \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^m \lambda_{jl} S_{jl} = 0 \quad (12)$$

$$F\varphi_s = e_s \varphi_s, s = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

$$\bar{F}\bar{\varphi}_t = \bar{e}_t \bar{\varphi}_t, t = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

для электронов и позитронов. Операторы Фока F \bar{F} имеют вид

$$F = f_i + \sum_{i=1}^n (J_i - K_i) - \sum_{j=1}^m \bar{J}_j, \quad (15)$$

$$\bar{F} = \bar{f}_i + \sum_{i=1}^m (\bar{J}_i - \bar{K}_i) - \sum_{j=1}^n J_j, \quad (16)$$

Развитый формализм решения задачи для общего случая системы $A - \bar{A}$ был применен к взаимодействию $H - \bar{H}$ и $He - \bar{He}$. Потенциал межатомных взаимодействий $A - \bar{A}$ при этом совпадал с более точными вариационными расчетами [49, 50, 52].

Рассмотрим простейшие связанные лептонные состояния систем с числом лептонов один и два в поле протона p и антипротона \bar{p} .

Системы $p - H$ и $\bar{p} - \bar{H}$. Эти системы представляют собой молекулярный ион водорода H_2^+ и молекулярный ион антиводорода \bar{H}_2^- . Свойства таких систем хорошо известны и приводятся во всех монографиях по квантовой химии.

Системы $\bar{p} - H$ и $p - \bar{H}$. В этом случае слагаемые гамильтониана (1) имеют вид

$$H_0 = -\frac{1}{2} \nabla^2 - \frac{1}{\bar{r}_{a1}}, \quad (17)$$

$$V = -\frac{1}{R} - \frac{1}{\bar{R} - \bar{r}_a} \quad (18)$$

Как было показано ранее [14] на основании известных работ по квантовых системам в физике и химии (см. ссылку в [14]), для решения задачи с гамильтонианом (17) и (18) ($H = H_0 + V$) может быть использовано приближение связанных состояний лептона на диполе конечной длины. Уравнение Шредингера, описывающее движение лептона на этом диполе конечной длины R , так что $\mu = eR$ - дипольный момент, в сферических координатах имеет вид

$$\left(\frac{1}{2} \nabla^2 - \frac{\mu}{r^2} \cos\theta - E \right) \psi = 0 \quad (19)$$

Здесь, как обычно, $\psi = R(r)Y(\theta, \varphi)$.

Предварительно заметим, что собственные значения энергии лептона $E(\mu_1(R)) = \varepsilon(\mu) / R^2$, где μ_1 - некоторая функция только μ , так что μ при $E = 0$ независимо от R . Существует критическое значение μ_0 , при котором лептоны «уходят» из связанного состояния на диполе (в случае точечного диполя $R = 0$). В этом случае, если $\mu > \mu_0$, может наблюдаться «падение» лептона на центр [54] ($E \rightarrow -\infty$). Уравнение (19) для радиальной части $R(r)$ при $E = 0$ имеет вид

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} + \frac{C}{r^2} = 0, \quad (20)$$

где C - постоянная разделения переменных. Уравнение (20) подробно обсуждено Л.Ландау и Е.Лифшицем [54]. Показано, что удовлетворяющее критическому случаю

решение $R(r) = Ar^{-1/2}$ существует только для случая $C = 1/4$. Так как угловой момент относительно Z оси имеет постоянное значение, равное нулю для основного состояния, то уравнение для угловой части Y запишется в виде

$$\left(\frac{d}{d\eta}\right)\left[(1-\eta)^2\left(\frac{dY}{d\eta}\right)\right] + (2\mu\eta - C)Y = 0, \quad (21)$$

где $\eta = \cos\theta$. Решение (21) есть

$$Y = \sum_{l=0}^{\infty} a_l P_l(\eta), \quad (22)$$

P_l - полином Лежандра. Из (21) и (22) можно получить соотношение

$$[l/(2l-1)(2l+1)^2]a_{l-1} - (8\mu)^{-1}a_l + [(l+1)/(2l+3)(2l+1)^2]a_{l+1} = 0, \quad (23)$$

где принято во внимание, что $C = 1/4$. Таким образом, критическое значение μ_0 дается наибольшим собственным значением $\lambda = (1/8)\mu_0$ матрицы величины λ . Первое приближение матрицы λ дает $\mu_0 \approx 3\sqrt[3]{3} = 0,6495$, что близко к точному численному расчету $\mu_0 = 0.639315\dots$, что соответствует величине дипольного момента в единицах Дебая $\mu_0 = 1,62487$ Д. Таким образом, критическое значение, при котором исчезает основное состояние лептона на диполе $p - \bar{p}$, $R_c \geq 0,639315 a_0$. Следует отметить, что возникает вопрос физического смысла «падения» лептона на центр при $\mu > \mu_0$ для диполя типа $p - \bar{p}$. Может быть это явление способствует образованию связанных состояний $p - \bar{p}$ (протоний) с последующей аннигиляцией p с \bar{p} . Это вопрос нуждается в дальнейших исследованиях.

Системы $H - H$ и $\bar{H} - \bar{H}$. Они представляют собой обычные молекулы водорода H_2 и антиводорода \bar{H}_2 . Их свойства хорошо изучены и приводятся во всех монографиях по квантовой химии.

Системы $H - \bar{H}$. Рассмотрим более подробно случай взаимодействия водород-антиводород. В приближении Гайтлера-Лондона волновую функцию такой системы запишем в виде

$$\varphi(\vec{r}, \vec{r}') = \varphi_{\bar{H}\eta}(\vec{r})\varphi_{\bar{H}\eta}(\vec{r}') \quad (24)$$

Гамильтониан системы типа (2), (3) позволяет вычислить полную энергию системы $H - \bar{H}$

$$H = -\frac{1}{2}\nabla^2 - \frac{1}{2}\nabla'^2 - \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + \frac{1}{|\vec{r} - \vec{R}|} + \frac{1}{|\vec{r}' - \vec{R}|} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{R} - \vec{r}'|} - \frac{1}{R} \quad (25)$$

Исходя из (24), (25) нетрудно вычислить полную энергию системы

$$E_{H-\bar{H}} = E_{H\eta} + E_{\bar{H}\eta'} + J = E_{H\eta} + E_{\bar{H}\eta'} + \iint \varphi_{H\eta}^*(\vec{r}) \varphi_{\bar{H}\eta'}^*(\vec{r}') \cdot \left[\frac{1}{|\vec{r} - \vec{R}|} + \frac{1}{|\vec{r}' - \vec{R}|} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{R} - \vec{r}'|} - \frac{1}{R} \right] \varphi_{H\eta}(\vec{r}) \varphi_{\bar{H}\eta'}(\vec{r}') d\vec{r} d\vec{r}' \quad (26)$$

Здесь $E_{H\eta}$ $E_{\bar{H}\eta'}$ – энергия электрона и позитрона на p и \bar{p} соответственно, а кулоновский интеграл J включает в себя четыре кулоновских взаимодействия: электрон-позитрон и протон-антипротон. Энергия ионизации такой системы в отношении распада системы на p и \bar{p} и свободные лептоны (электрон и позитрон) равна при этом [55]

$$E_I = E_{H\eta} + E_{\bar{H}\eta'} + J + \frac{1}{R} \quad (27)$$

Однако могут возникать и такие ситуации, когда система диссоциирует на электрон (энергия ионизации E_1) или позитрон (энергия ионизации E_2) с образованием систем $p-H$ и $\bar{p}-\bar{H}$ соответственно. Рассчитанные [57] энергии ионизации первого и второго лептонов подтвердили вывод [55,56] о существовании связанных состояний на $p-\bar{p}$ лишь при определенных значениях R . Связанные состояния позитрония (Ps) на $p-\bar{p}$ осуществляются лишь при $R_c \geq 0,96a_0$, а электрона или позитрона – при $R_c \geq 0,64a_0$ [52, 55, 56].

Время жизни позитрона в системе $H-\bar{H}$ относительно 2γ – аннигиляции рассчитывается по формуле

$$\tau = 1,25 \cdot 10^{-10} \cdot \rho(Ps) / \rho(R), \text{ с} \quad (28)$$

где $\rho(Ps)$ – электронная плотность в нуле в атоме позитрония, а $\rho(R)$ – электронная плотность на позитроне, определяемая выражением

$$\rho(R) = \langle \varphi(\vec{r}, \vec{r}', \vec{R}) | \delta(\vec{r} - \vec{r}') | \varphi(\vec{r}, \vec{r}', \vec{R}) \rangle \quad (29)$$

Например, при $R = 0,975a_0$, по данным [56], $\rho(R) / \rho(Ps) = 0,4$ и отсюда $\tau = 3,1 \cdot 10^{-10} \cdot \text{с}$.

Заключение

Методы квантовомеханических расчетов процессов взаимодействия вещества и антивещества нуждаются в дальнейшем развитии. Сюда прежде всего относятся вопросы взаимодействия молекул и антимолекул в газовой фазе, отдельных кристаллов вещества и антивещества при малоинтенсивной аннигиляции и других конденсированных сред, состоящих из вещества и антивещества.

Следует отметить также, что полученные выше результаты с успехом могут быть использованы для расчета связанных состояний лептонов (электроны, дырки, позитроны) на системах $A-A$, $D-D$, $A-D$ различной степени ионизации в твердых телах (A, D – символы акцепторов и доноров соответственно), что имеет фундаментальное значение для полупроводниковой электроники и физики медленных позитронов как новой области исследований. Действительно, системы $A-A$, $D-D$, $A-D$ в ансамблях дефектов полупроводников зачастую во многом определяют электрофизические и оптические свойства, а также процессы геттерирования материалов электронной техники. Особо важную роль приведенные выше результаты имеют для более глубокого понимания проблемы суператомов и суперантиатомов в полупроводниковых структурах [12, 14, 18, 19].

Примечания:

1. Сахаров А.Д. Научные труды. Сборник. М.: АОЗТ «Издательство ЦентрКом», 1995.
2. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1988.
3. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1984. 224 с.
4. Власов Н.А. Антивещество. М.: Атомиздат. 1968.
5. Гинзбург В.Л. и др. Астрофизика космических лучей. / Под ред. В.Л. Гинзбурга. М.: Наука. 1990.
6. Прокопьев Е.П. // Оборонный комплекс-научно-техническому прогрессу России. 2003. №2. С. 10-14. С.15, 16. С. 17-19; №3. С.39-41.
7. Колинз Г. Получение холодного антиводорода // В мире науки. 2005. №.9. С.52-59.
8. Альвен Х. Космическая плазма. М.: Мир, 1983.
9. Чуразов Е.М., Сюняев Р.А., Сазонов С.Ю., Ревнивцев М.Г., Варшалович Д.А. Аннигиляционное излучение центральной зоны Галактики: результаты обсерватории ИНТЕГРАЛ // УФН, 2006. Т.176, №3, с.334-339.
10. Ting C.C. et al. Physics Reports. 2002. Vol.366/6. P.331-404; Phys. Lett. 1999. Vol.B461. P.387-396; 2000. Vol.B472. P.215-226; 2000. Vol.B484. P.10-22; 2000. Vol.B490. P.27-35; 2000. Vol.B494. P.193-202.
11. Прокопьев Е.П. О роли исследования позитронных и позитрониевых состояний в науке и технике // В кн.: “Симпозиум по взаимодействию атомных частиц с поверхностью твердого тела, посвященного памяти академика АН УзССР У.А. Арифова”. Ташкент: ФАН, 1979. С.113.
12. Арефьев К.П., Воробьев С.А., Прокопьев Е.П. Позитроника в радиационном материаловедении ионных структур и полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1983. 88 с.
13. Прокопьев Е.П. О процессе аннигиляции позитронов в галактической среде с низкой плотностью // В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов 41 Международного совещания. Л.: Наука, 1991. С.453.
14. Прокопьев Е.П. О взаимодействии вещества и антивещества. Системы \bar{p} -H, p- \bar{H} и H- \bar{H} . Приложения в электронике // Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. 1992. Вып.4. С.65-68.
15. Прокопьев Е.П. Позитронная астрофизика и позитронные состояния в галактической среде с низкой плотностью // Астрономический журнал. 1994. Т.70. №3. С.906-908.
16. Prokop'ev E.P. Positron annihilation and positron states in galactic medium with low density // Abstracts of 10 th International Conference on positron annihilation. Beijing, China, May 23-29, 1994. С24-2.
17. Прокопьев Е.П., Графутин В.И., Тимошенко С.П. О возможности использования атома позитрония в проблеме квантовой телепортации. В кн.: Международный научно-технический семинар “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. Материалы семинара. Рязань: Изд-во Рязанской государственной радиотехнической академии, 1999. С.138-140.
18. Прокопьев Е.П., Тимошенко С.П., Графутин В.И., Мясищева Г.Г., Фунтиков Ю.В. Позитроника ионных кристаллов, полупроводников и металлов. М.: Ред.-изд. отдел МИЭТ (ТУ), 1999. 176 с.
19. Графутин В.И., Прокопьев Е.П. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества // Успехи физических наук. 2002. Т. 172. №1. С. 67-83.
20. Прокопьев Е.П. О возможности аннигиляционных источников энергии // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2003. №2. С. 10-14.
21. Прокопьев Е.П. О проблеме использования антиводорода в космической технике будущего // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2003. №2. С. 15-16.
22. Прокопьев Е.П. Получение интенсивных потоков позитронов и их применение. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2003. №2. С. 17-19.

23. Прокопьев Е.П. Возможность получения энергии и антивещества при низких энергиях: вероятный физический механизм самоорганизации при ядерном синтезе, трансформации элементов и синтезе антивещества. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2004. №3. С. 39, 40.

24. Светлов-Прокопьев Е.П. Особенности рождения ранних вселенных и позитронная аннигиляция. Вестник КазНУ, сер. физ., 2003. Т.2(15). С.7-10. (Материалы докладов 3-й Международной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». Казахстан, Алматы, 1-3 октября 2003 г.).

25. Светлов-Прокопьев Е.П. Вероятный физический механизм самоорганизации при ядерном синтезе и синтезе антивещества при низких энергиях. Тезисы доклада. «Вторая междисциплинарная (биология, медицина, физика, химия...) конференция, посвященная 300-летию г.Петрозаводска «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии XXI века» («НБИТТ-21»). 23–25 июня 2003 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. С. 51.

26. Светлов-Прокопьев Е.П. О рождении антиматерии при столкновениях атомных ядер с $Z > 85$ в «тяжелой» высокотемпературной плазме и возможная схема аннигиляционного двигателя. Тезисы доклада. «Вторая междисциплинарная (биология, медицина, физика, химия) конференция, посвященная 300-летию г.Петрозаводска «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии 21 века» («НБИТТ-21»). 23-25 июня 2003 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. С. 50, 51.

27. Светлов-Прокопьев Е.П. Обзор о рождении Вселенной посредством квантового туннелирования. Тезисы доклада 3-й Международной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». Казахстан, Алматы, 1-3 октября 2003 г. С. 105.

28. Светлов-Прокопьев Е.П. Об особенностях рождения ранних вселенных Хартла-Хокинга. Тезисы доклада 3-й Международной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». Казахстан, Алматы, 1-3 октября 2003 г. С.106.

29. Прокопьев Е.П. О возможности получения антивещества при низких энергиях: вероятный физический механизм самоорганизация при ядерном (термоядерном) синтезе и синтезе антивещества. Abstracts of 4-th International Conference. NUCLEAR AND RADIATION PHYSICS (ICNRP '03). 15-17 September 2003. Almaty: Institute of Nuclear Physics, Republic of Kazakstan, 2003. С.144.

30. Светлов-Прокопьев Е.П. Вероятный физический механизм самоорганизации при ядерном синтезе и синтезе антивещества при низких энергиях. Тезисы доклада. «Вторая междисциплинарная (биология, медицина, физика, химия) конференция, посвященная 300-летию г.Петрозаводска «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии 21 века» («НБИТТ-21»). 23-25 июня 2003 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. С.51.

31. Светлов-Прокопьев Е.П. О рождении антиматерии при столкновениях атомных ядер с $Z > 85$ в «тяжелой» высокотемпературной плазме и возможная схема аннигиляционного двигателя. Тезисы доклада. «Вторая междисциплинарная (биология, медицина, физика, химия) конференция, посвященная 300-летию г.Петрозаводска «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии 21 века» («НБИТТ-21»). 23-25 июня 2003 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2003. С.50,51.

32. Светлов-Прокопьев Е.П. Проблема физики и химии антивещества и возможности его синтеза. Доклад и тезисы докладов 54 Международного Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (ЯДРО-2004) 22-26 июня 2004. Россия, Белгород. БелгорГУ. 2004. С. 264, 265.

33. Светлов-Прокопьев Е.П. Возможности получения интенсивных потоков позитронов и их применение. Доклад и тезисы докладов 54 Международного Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (ЯДРО-2004) 22-26 июня 2004. Россия, Белгород. БелгорГУ. 2004. С. 266, 267.

34. Светлов-Прокопьев Е.П. Возможная концепция Мирового Разума. Тезисы доклада. «Третья междисциплинарная (биология, медицина, физика, химия, математика, образование,...) конференция «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии 21 века» («НБИТТ-21»). 21-23 июня 2004 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2004. С.48.

35. Светлов-Прокопьев Е.П. О проблеме физики и химии антивещества и возможности его синтеза. Тезисы доклада. «Третья междисциплинарная (биология, медицина, физика, химия, математика, образование...) конференция «Новые биокибернетические и телемедицинские технологии XXI века» («НБИТТ-21»). 21-23 июня 2004 г. Петрозаводск: ПетрГУ, 2004. С. 49, 50.

36. Светлов-Прокопьев Е.П. Проблема физики и химии антивещества и возможности его синтеза. Материалы VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (11-12 ноября 2004, г. Красноярск)/СибГАУ. Красноярск, 2004. 302 с.). С. 102, 103.

37. Суворов А.Л., Разинкова Т.Л. и др. Некоторые вопросы проблемы физики, химии и технологии антивещества: возможности синтеза, хранения, исследования свойств, поиска во Вселенной и применений. Программа и доклад на Юбилейной научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященной 60 летию ИТЭФ (5–9 декабря 2005 г.). Москва: ФГУП ГНЦ РФ ИТЭФ им. А.И.Алиханова, 2005. С.11.

38. Суворов А.Л., Разинкова Т.Л. и др. Исследование позитронных состояний в космической плазме. Программа и доклад на Юбилейной научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященной 60-летию ИТЭФ (5 – 9 декабря 2005 г.). Москва: ФГУП ГНЦ РФ ИТЭФ им. А.И. Алиханова, 2005. С. 11.

39. Разинкова Т.Л., Светлов-Прокопьев Е.П. Позитронсодержащие атомные системы в космической плазме. Программа и доклад на Юбилейной научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященной 60-летию ИТЭФ (5 – 9 декабря 2005 г.). Москва: ФГУП ГНЦ РФ ИТЭФ им. А.И. Алиханова, 2005. С. 22.

40. Светлов-Прокопьев Е.П. Возможные проблемы высоких космических технологий будущего. «Решетневские чтения». Материалы IX Международной научной конференции, посвященной 45-летию Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева (10–12 ноября 2005, г.Красноярск), СибГАУ. Красноярск, 2005). С. 5, 6.

41. Светлов-Прокопьев Е.П., Разинкова Т.Л., Графутин В.И., Фунтиков Ю.В. Исследование позитронных состояний в космической плазме. Труды 5-ой Международной конференции "Ядерная и радиационная физика". 26-29 сентября 2005 года. Алматы, Республика Казахстан. ИЯФ НЯЦ РК: 2005. С. 147.

42. Графутин В.И., Разинкова Т.Л., Светлов-Прокопьев Е.П., Фунтиков Ю.В. Позитронная аннигиляция и космическая гамма - астрономия. Труды 5-ой Международной конференции "Ядерная и радиационная физика". 26-29 сентября 2005 года. Алматы, Республика Казахстан. ИЯФ НЯЦ РК: 2005. С. 169.

43. Светлов-Прокопьев Е.П., Разинкова Т.Л., Графутин В.И., Фунтиков Ю.В. Позитронная аннигиляция и космическая гамма – астрономия. Тезисы доклада 4-й Международной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». Казахстан, Алматы, 5-7 октября 2005 г. С.115,116.

44. Разинкова Т.Л., Светлов-Прокопьев Е.П. Проблема физики и химии антивещества: возможности исследования свойств, поиска во Вселенной, синтеза и применений. Труды 5-ой Международной конференции "Ядерная и радиационная физика". 26-29 сентября 2005 года. Алматы, Республика Казахстан. ИЯФ НЯЦ РК: 2005. С. 172.

45. Прокопьев Е.П. Возможность получения антивещества в космическом пространстве с использованием энергии Солнца // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2006. №2. С.63-65.

46. Суворов А.Л. и др. Получение антивещества в космическом пространстве для использования энергии солнца. // Петербургский журнал электроники. 2005. №4. С.59-61.

47. Суворов А.Л. и др. Исследование позитронных состояний в космической плазме. // Вестник КазНУ, серия физическая. 2006. №1(21). С. 155-158.

48. Suvorov A.L., Funtikov Yu.V., Grafutin V.I., Razinkova T.L., Svetlov-Prokop'ev E.P., Zakharov A.F. Research of positron states in space. Abstracts of the 6th INTEGRAL Workshop «The Obscured Universe». 2-8 July 2006. Space Research Institute Russian Academy of Sciences. Moscow. P. 28.

49. Morgan D.L., Jr., Hughes V.W. Atomic processes involved in matter-antimatter // *Phys. Rev. D*. 1970. Vol.2. №8. P. 1389-1399.
50. Morgan D.L., Jr., Hughes V.W. Atom-antiatom interactions // *Phys. Rev. A*. 1973. Vol.7. №6. P. 1811-1825.
51. Fermi, E. Teller E. // *Phys. Rev.* 1947. Vol.72. №8. P.399-408.
52. Junker B.R., Bardsley J.N. // *Phys. Rev. Lett.* 1972. Vol.28. №19. P.1227-1229.
53. Chojnacki H., Roszak S. // *Acta phys. polonica* // 1985. Vol.A67. №4. P.811-814.
54. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Физматгиз, 1963.
55. Kolos, W. Morgan, D.L. Jr., Schrader D.M., Wolniewicz A. // *Phys. Rev. A*. 1975. Vol.11. №6. P. 1792-1796.
56. Bardsley J.N., Brandt W., Dupasquier A., Junker B.R. // *Phys. Rev. B*. 1976. Vol.13. №9. P. 4175-4177.
57. Прокопьев Е.П. Введение в теорию позитронных процессов в полупроводниках и ионных кристаллах. М.: ЦНИИ «Электроника», P-2837, 1979. 384 с.

References:

1. Sakharov A.D. Nauchnye trudy. Sbornik. M.: AOZT «Izdatel'stvo TsentrKom», 1995.
2. Dolgov A.D., Zel'dovich Ya.B., Sazhin M.V. Kosmologiya rannei Vselennoi. M.: Izd-vo MGU, 1988.
3. Okun' L.B. Fizika elementarnykh chastits. M.: Nauka, 1984. 224 s.
4. Vlasov N.A. Antiveshchestvo. M.: Atomizdat. 1968.
5. Ginzburg V.L. i dr. Astrofizika kosmicheskikh luchei. / Pod red. V.L. Ginzburga. M.: Nauka. 1990.
6. Prokop'ev E.P. // *Oboronnyi kompleks-nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii*. 2003. №2. S. 10-14. S.15, 16. S. 17-19; №3. S.39-41.
7. Kolinz G. Poluchenie kholodnogo antivodoroda // *V mire nauki*. 2005. №.9. S.52-59.
8. Al'ven Kh. Kosmicheskaya plazma. M.: Mir, 1983.
9. Churazov E.M., Syunyaev R.A., Sazonov S.Yu., Revnitssev M.G., Varshalovich D.A. Annigilyatsionnoe izluchenie tsentral'noi zony Galaktiki: rezul'taty observatorii INTEGRAL // *UFN*, 2006. T.176, №3, s.334-339.
10. Ting C.C. et al. *Physics Reports*. 2002. Vol.366/6. P.331-404; *Phys. Lett.* 1999. Vol.B461. P.387-396; 2000. Vol.B472. P.215-226; 2000. Vol.B484. P.10-22; 2000. Vol.B490. P.27-35; 2000. Vol.B494. P.193-202.
11. Prokop'ev E.P. O roli issledovaniya pozitronnykh i pozitronievykh sostoyanii v nauke i tekhnike // V kn.: «Симпозиум по взаимодействию атомных частиц с поверхностью твердого тела, посвященного памяти академика АН УзССР У.А. Арифова». Tashkent: FAN, 1979. S.113.
12. Aref'ev K.P., Vorob'ev S.A., E.P.Prokop'ev. Pozitronika v radiatsionnom materialovedenii ionnykh struktur i poluprovodnikov. M.: Energoatomizdat, 1983. 88 s.
13. Prokop'ev E.P. O protsesse annigilyatsii pozitronov v galakticheskoi srede s nizkoi plotnost'yu // V kn.: *Yadernaya spektroskopiya i struktura atomnogo yadra. Tezisy dokladov 41 Mezhdunarodnogo soveshchaniya*. L.: Nauka, 1991. S.453.
14. Prokop'ev E.P. O vzaimodeistvii veshchestva i antiveshchestva. Sistemy $-N$, r - i N - . Prilozheniya v elektronike // *Elektronnaya tekhnika*. Ser.3. Mikroelektronika. 1992. Vyp.4. S.65-68.
15. Prokop'ev E.P. Pozitronnaya astrofizika i pozitronnye sostoyaniya v galakticheskoi srede s nizkoi plotnost'yu // *Astronomicheskii zhurnal*. 1994. T.70. №3. S.906-908.
16. Prokop'ev E.P. Positron annihilation and positron states in galactic medium with low density // *Abstracts of 10 th International Conference on positron annihilation*. Beijing, China, May 23-29, 1994. C24-2.
17. Prokop'ev E.P., Grafutin V.I., Timoshenkov S.P. O vozmozhnosti ispol'zovaniya atoma pozitroniya v probleme kvantovoi teleportatsii. V kn.: *Mezhdunarodnyi nauchno-tehnicheskii seminar "Problemy peredachi i obrabotki informatsii v setyakh i sistemakh telekommunikatsii"*. Materialy seminara. Ryazan': Izd-vo Ryazanskoj gosudarstvennoj radiotekhnicheskoi akademii, 1999. S.138-140.

18. Prokop'ev E.P., Timoshenkov S.P., Grafutin V.I., Myasishcheva G.G., Funtikov Yu.V. Pozitronika ionnykh kristallov, poluprovodnikov i metallov. M.: Red.-izd. otdel MIET (TU), 1999. 176 s.
19. Grafutin V.I., Prokop'ev E.P. Primenenie pozitronnoi annigilyatsionnoi spektroskopii dlya izucheniya stroeniya veshchestva // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2002. T. 172. №1. S. 67-83.
20. Prokop'ev E.P. O vozmozhnosti anigilyatsionnykh istochnikov energii // Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii. 2003. №2. S. 10-14.
21. Prokop'ev E.P. O probleme ispol'zovaniya antivodoroda v kosmicheskoi tekhnike budushchego // Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii. 2003. №2. S. 15-16.
22. Prokop'ev E.P. Poluchenie intensivnykh potokov pozitronov i ikh primenenie. // Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii. 2003. №2. S. 17-19.
23. Prokop'ev E.P. Vozmozhnost' polucheniya energii i antiveshchestva pri nizkikh energiyakh: veroyatnyi fizicheskii mekhanizm samoorganizatsii pri yadernom sinteze, transformatsii elementov i sinteze antiveshchestva. // Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii. 2004. №3. S. 39, 40.
24. Svetlov-Prokop'ev E.P. Osobennosti rozhdeniya rannikh vseennykh i pozitronnaya annigilyatsiya. Vestnik KazNU, ser. fiz., 2003. T.2(15). S.7-10. (Materialy dokladov 3-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennye dostizheniya fiziki i fundamental'noe fizicheskoe obrazovanie». Kazakhstan, Almaty, 1-3 oktyabrya 2003 g.).
25. Svetlov-Prokop'ev E.P. Veroyatnyi fizicheskii mekhanizm samoorganizatsii pri yadernom sinteze i sinteze antiveshchestva pri nizkikh energiyakh. Tezisy doklada. «Vtoraya mezhdistsiplinarnaya (biologiya, meditsina, fizika, khimiya...) konferentsiya, posvyashchennaya 300-letiyu g.Petrozavodska «Novye biokiberneticheskie i telemeditsinskie tekhnologii XXI veka» («NBITT-21»). 23–25 iyunya 2003 g. Petrozavodsk: PetrGU, 2003. S. 51.
26. Svetlov-Prokop'ev E.P. O rozhdenii antimaterii pri stolknoveniyakh atomnykh yader s $Z > 85$ v «tyazheloi» vysokotemperaturnoi plazme i vozmozhnaya skhema annigilyatsionnogo dvigatelya. Tezisy doklada. «Vtoraya mezhdistsiplinarnaya (biologiya, meditsina, fizika, khimiya) konferentsiya, posvyashchennaya 300-letiyu g.Petrozavodska «Novye biokiberneticheskie i telemeditsinskie tekhnologii 21 veka» («NBITT-21»). 23-25 iyunya 2003 g. Petrozavodsk: PetrGU, 2003. S.50,51.
27. Svetlov-Prokop'ev E.P. Obzor o rozhdenii Vselennoi posredstvom kvantovogo tunnelirovaniya. Tezisy doklada 3-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennye dostizheniya fiziki i fundamental'noe fizicheskoe obrazovanie». Kazakhstan, Almaty, 1-3 oktyabrya 2003 g. S. 105.
28. Svetlov-Prokop'ev E.P. Ob osobennostyakh rozhdeniya rannikh vseennykh Khartla-Khokinga. Tezisy doklada 3-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennye dostizheniya fiziki i fundamental'noe fizicheskoe obrazovanie». Kazakhstan, Almaty, 1-3 oktyabrya 2003 g. S.106.
29. Prokop'ev E.P. O vozmozhnosti polucheniya antiveshchestva pri nizkikh energiyakh: veroyatnyi fizicheskii mekhanizm samoorganizatsiya pri yadernom (termoyadernom) sinteze i sinteze antiveshchestva. Abstracts of 4-th International Conference. NUCLEAR AND RADIATION PHYSICS (ICNRP '03). 15-17 September 2003. Almaty: Institute of Nuclear Physics, Republic of Kazakstan, 2003. C.144.
30. Svetlov-Prokop'ev E.P. Veroyatnyi fizicheskii mekhanizm samoorganizatsii pri yadernom sinteze i sinteze antiveshchestva pri nizkikh energiyakh. Tezisy doklada. «Vtoraya mezhdistsiplinarnaya (biologiya, meditsina, fizika, khimiya) konferentsiya, posvyashchennaya 300-letiyu g.Petrozavodska «Novye biokiberneticheskie i telemeditsinskie tekhnologii 21 veka» («NBITT-21»). 23-25 iyunya 2003 g. Petrozavodsk: PetrGU, 2003. S.51.
31. Svetlov-Prokop'ev E.P. O rozhdenii antimaterii pri stolknoveniyakh atomnykh yader s $Z > 85$ v «tyazheloi» vysokotemperaturnoi plazme i vozmozhnaya skhema annigilyatsionnogo dvigatelya. Tezisy doklada. «Vtoraya mezhdistsiplinarnaya (biologiya, meditsina, fizika, khimiya) konferentsiya, posvyashchennaya 300-letiyu g.Petrozavodska «Novye biokiberneticheskie i telemeditsinskie tekhnologii 21 veka» («NBITT-21»). 23-25 iyunya 2003 g. Petrozavodsk: PetrGU, 2003. S.50,51.
32. Svetlov-Prokop'ev E.P. Problema fiziki i khimii antiveshchestva i vozmozhnosti ego sinteza. Doklad i tezisy dokladov 54 Mezhdunarodnogo Soveshchaniya po yadernoi spektroskopii i

strukture atomnogo yadra (YaDRO-2004) 22-26 iyunya 2004. Rossiya, Belgorod. BelgorGU. 2004. C. 264, 265.

33. Cvetlov-Prokop'ev E.P. Vozmozhnosti polucheniya intensivnykh potokov pozitronov i ikh primenenie. Doklad i tezisy dokladov 54 Mezhdunarodnogo Soveshchaniya po yadernoi spektroskopii i strukture atomnogo yadra (YaDRO-2004) 22-26 iyunya 2004. Rossiya, Belgorod. BelgorGU. 2004. C. 266, 267.

34. Svetlov-Prokop'ev E.P. Vozmozhnaya kontseptsiya Mirovogo Razuma. Tezisy doklada. «Tret'ya mezhdistsiplinarnaya (biologiya, meditsina, fizika, khimiya, matematika, obrazovanie...) konferentsiya «Novye biokiberneticheskie i telemeditsinskie tekhnologii 21 veka» («NBITT-21»). 21-23 iyunya 2004 g. Petrozavodsk: PetrGU, 2004. S.48.

35. Svetlov-Prokop'ev E.P. O probleme fiziki i khimii antiveshchestva i vozmozhnosti ego sinteza. Tezisy doklada. «Tret'ya mezhdistsiplinarnaya (biologiya, meditsina, fizika, khimiya, matematika, obrazovanie,...) konferentsiya «Novye biokiberneticheskie i telemeditsinskie tekhnologii XXI21 veka» («NBITT-21»). 21-23 iyunya 2004 g. Petrozavodsk: PetrGU, 2004. S. 49, 50.

36. Svetlov-Prokop'ev E.P. Problema fiziki i khimii antiveshchestva i vozmozhnosti ego sinteza. Materialy VIII Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 80-letiyu so dnya rozhdeniya general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva (11-12 noyabrya 2004, g. Krasnoyarsk)/SibGAU. Krasnoyarsk, 2004. 302 s.). S. 102, 103.

37. Suvorov A.L., Razinkova T.L. i dr. Nekotorye voprosy problemy fiziki, khimii i tekhnologii antiveshchestva: vozmozhnosti sinteza, khraneniya, issledovaniya svoystv, poiska vo Vselennoi i primenenii. Programma i doklad na Yubileinoi nauchnoi sessii-konferentsii seksii YaF OFN RAN «Fizika fundamental'nykh vzaimodeistvii», posvyashchennoi 60 letiyu ITEF (5–9 dekabrya 2005 g.). Moskva: FGUP GNTs RF ITEF im. A.I.Alikhanova, 2005. S.11.

38. Suvorov A.L., Razinkova T.L. i dr. Issledovanie pozitronnykh sostoyanii v kosmicheskoi plazme. Programma i doklad na Yubileinoi nauchnoi sessii-konferentsii seksii YaF OFN RAN «Fizika fundamental'nykh vzaimodeistvii», posvyashchennoi 60-letiyu ITEF (5 – 9 dekabrya 2005 g.). Moskva: FGUP GNTs RF ITEF im. A.I.Alikhanova, 2005. S. 11.

39. Razinkova T.L., Svetlov-Prokop'ev E.P. Pozitronsoderzhashchie atomnye sistemy v kosmicheskoi plazme. Programma i doklad na Yubileinoi nauchnoi sessii-konferentsii seksii YaF OFN RAN «Fizika fundamental'nykh vzaimodeistvii», posvyashchennoi 60-letiyu ITEF (5–9 dekabrya 2005 g.). Moskva: FGUP GNTs RF ITEF im. A.I.Alikhanova, 2005. S. 22.

40. Svetlov-Prokop'ev E.P. Vozmozhnye problemy vysokikh kosmicheskikh tekhnologii budushchego. «Reshetnevskie chteniya». Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 45-letiyu Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F.Reshetneva (10–12 noyabrya 2005, g.Krasnoyarsk), SibGAU. Krasnoyarsk, 2005). S. 5, 6.

41. Svetlov-Prokop'ev E.P., Razinkova T.L., Grafutin V.I., Funtikov Yu.V. Issledovanie pozitronnykh sostoyanii v kosmicheskoi plazme. Trudy 5-oi Mezhdunarodnoi konferentsii "Yadernaya i radiatsionnaya fizika". 26-29 sentyabrya 2005 goda. Almaty, Respublika Kazakhstan. IYaF NYaTs RK: 2005. S. 147.

42. Grafutin V.I., Razinkova T.L., Svetlov-Prokop'ev E.P., Funtikov Yu.V. Pozitronnaya annigilyatsiya i kosmicheskaya gamma - astronomiya. Trudy 5-oi Mezhdunarodnoi konferentsii "Yadernaya i radiatsionnaya fizika". 26-29 sentyabrya 2005 goda. Almaty, Respublika Kazakhstan. IYaF NYaTs RK: 2005. S. 169.

43. Svetlov-Prokop'ev E.P., Razinkova T.L., Grafutin V.I., Funtikov Yu.V. Pozitronnaya annigilyatsiya i kosmicheskaya gamma – astronomiya. Tezisy doklada 4-i Mezhdunarodnoi konferentsii «Sovremennye dostizheniya fiziki i fundamental'noe fizicheskoe obrazovanie». Kazakhstan, Almaty, 5-7 oktyabrya 2005 g. S.115,116.

44. Razinkova T.L., Svetlov-Prokop'ev E.P. Problema fiziki i khimii antiveshchestva: vozmozhnosti issledovaniya svoystv, poiska vo Vselennoi, sinteza i primenenii. Trudy 5-oi Mezhdunarodnoi konferentsii "Yadernaya i radiatsionnaya fizika". 26-29 sentyabrya 2005 goda. Almaty, Respublika Kazakhstan. IYaF NYaTs RK: 2005. S. 172.

45. Prokop'ev E.P. *Vozможnost' polucheniya antiveshchestva v kosmicheskom prostranstve s ispol'zovaniem energii Solntsa. Oboronnyi kompleks - nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii.* 2006. №2. S.63-65.
46. Suvorov A.L. i dr. *Poluchenie antiveshchestva v kosmicheskom prostranstve dlya ispol'zovaniya energii solntsa. // Peterburgskii zhurnal elektroniki.* 2005. №4. S.59-61.
47. Suvorov A.L. i dr. *Issledovanie pozitronnykh sostoyanii v kosmicheskoi plazme. // Vestnik KazNU, seriya fizicheskaya.* 2006. №1(21). S. 155-158.
48. Suvorov A.L., Funtikov Yu.V., Grafutin V.I., Razinkova T.L., Svetlov-Prokop'ev E.P., Zakharov A.F. *Research of positron states in space. Abstracts of the 6th INTEGRAL Workshop «The Obscured Universe». 2-8 July 2006. Space Research Institute Russian Academy of Sciences. Moscow. P. 28.*
49. Morgan D.L., Jr., Hughes V.W. *Atomic processes involved in matter-antimatter // Phys. Rev. D.* 1970. Vol.2. №8. P. 1389-1399.
50. Morgan D.L., Jr., Hughes V.W. *Atom-antiatom interactions // Phys. Rev. A.* 1973. Vol.7. №6. P. 1811-1825.
51. Fermi, E. Teller E. // *Phys. Rev.* 1947. Vol.72. №8. R. 399-408.
52. Junker B.R., Bardsley J.N. // *Phys. Rev. Lett.* 1972. Vol.28. №19. R. 1227-1229.
53. Chojnacki H., Roszak S. // *Acta phys. polonica // 1985. Vol.A67. №4. P. 811-814.*
54. Landau L.D., Lifshits E.M. *Kvantovaya mekhanika. M.: Fizmatgiz, 1963.*
55. Kolos, W. Morgan, D.L. Jr., Schrader D.M., Wolniewicz A. // *Phys. Rev. A.* 1975. Vol.11. №6. P. 1792-1796.
56. Bardsley J.N., Brandt W., Dupasquier A., Junker B.R. // *Phys. Rev. B.* 1976. Vol.13. №9. P. 4175-4177.
57. Prokop'ev E.P. *Vvedenie v teoriyu pozitronnykh protsessov v poluprovodnikakh i ionnykh kristallakh. M.: TsNII «Elektronika», R-2837, 1979. 384 s.*

УДК 621.315

Антивещество: синтез, свойства, применения

1. Общие принципы взаимодействия вещества и антивещества.

Нерелятивистская теория

Евгений Петрович Прокопьев ^{a, *}

^a НИЦ «Курчатовский институт», ФГБУ «ГНЦ РФ – ИТЭФ», Российская Федерация

Аннотация. В нерелятивистском приближении на примере взаимодействия атомов с антиатомами в чрезвычайно разреженном газе (например, космической плазме) проанализирована проблема взаимодействия вещества и антивещества. Обсуждаются вопросы перестройки и аннигиляции при атом-антиатомных взаимодействиях, а также стационарные состояния систем атом-антиатом. Рассмотрены различные приближенные методы решения стационарной задачи, например, методы LCAO MO SCF и Гайтлера-Лондона.

Ключевые слова: антивещество, синтез, свойства, нерелятивистская теория.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: eprokopiev@mail.ru (Е.П. Прокопьев)

Copyright © 2015 by Academic Publishing House *Researcher*

Published in the Russian Federation
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
 Has been issued since 2015.
 ISSN: 2410-9347
 Vol. 1, Is. 1, pp. 45-50, 2015

DOI: 10.13187/rjar.2015.1.45
www.ejournal28.com



UDC 523.11

Electrical Charge in a Closed Universe

Dmitry D. Sokoloff ^{a, *}^a Lomonosov Moscow State University, Russian Federation

Abstract

In the framework of standard general relativity the electrical charge in a closed universe must vanish identically. Correspondingly, one can not consider, say, electrical field of an isolated charge or Green's function even hypothetically. A way to modify general relativity in order to allow such constructions is suggested. The idea of this modification is based on concept of geodesic mapping and tangent bundle.

Keywords: electrical charge, closed universe.

Введение

Общая теория относительности, без сомнения, является одним из величайших достижений человеческой мысли, фундаментом современной космологии. Однако она, как и другие великие физические теории, в чем-то ограничена и, наверное, в будущем подвергнется какой-то переработке под давлением экспериментальных и наблюдательных фактов. Накопление таких фактов представляет собой задачу чрезвычайно сложную технически и многие фундаментальные задачи, решение которых сейчас стоит в повестке дня теории и наблюдений (скажем, наблюдения гравитационных волн) были теоретически предложены много лет назад. Поэтому ожидать появления новой широко признанной теории, существенно развивающей общую теорию относительности в обозримом будущем не приходится несмотря на постоянные усилия специалистов по развитию подобной теории. Тем не менее, постепенно накапливается определенный запас неудовлетворенности от того, как именно общая теория относительности разрешает конкретные проблемы, встающие перед этой теорией. Конечно, эти проблемы были в определенной степени были видны и раньше, а иногда на них обращали внимание и сразу же после создания ОТО, но они благоразумно оставались без критического анализа для того, чтобы не тормозить решение тех задач, которые можно и нужно было решить. Эти проблемы нельзя решить и сегодня просто потому, что существующая теория научилась их обходить и имеющийся фактический материал не вынуждает нас что-либо менять в теории. Другими словами, эти проблемы можно на долгое время замести под ковер до лучших времен. Обычно подобные вопросы не входят в область внимания науки, которая ограничивается изучением актуальных вопросов. Тем не менее кажется, что ситуация в общей теории относительности сейчас созрела настолько, что обсуждение подобных вопросов все же становится возможным в принципе.

* Corresponding author

E-mail addresses: sokoloff.dd@gmail.com (D.D. Sokoloff)

Обсуждение

В предыдущих работах (Соколов, 2002, 2003) мы обсудили две таких темных проблемы и в данной работе обсуждаем еще одну. Общая черта, объединяющая все три темных места в общей теории относительности, состоит в том, что в логическом каркасе ОТО недостаточно прописано то, как и из каких соображений определяется многообразие, которое несет псевдориманову метрику. Можно сказать, что молчаливо предполагается, что мы интересуемся не слишком большой окрестностью наблюдателя, в которой рассматриваемое многообразие неотличимо топологически от евклидова пространства. Что при этом происходит вне этой окрестности, устанавливается не на уровне формулировки теории, а на уровне анализа конкретных решений уравнений Эйнштейна. Эта точка зрения очевидно непоследовательна, на что нелицеприятно указал, например, Ф. Клейн (1919) сразу же после формулировки ОТО. Он подчеркнул, что одна и та же локальная метрика может быть представлена в различных топологических версиях. В настоящее время именно этот аспект проблемы глобального строения космологических моделей лучше всего разработан и даже до определенной степени изучен наблюдательно (см. Лашез-Рей и Люмине, 1995), однако до логически стройной теории и здесь еще далеко (см, напр., Соколов, 2002, 2003).

Несомненно, что поступок Эйнштейна, который не стал концентрироваться на указанной трудности, а занялся позитивной разработкой теории, был исторически оправдан. Замечание Клейна является наиболее известным, но не единственным. За время существования ОТО таких замечаний набралось достаточное количество (см. напр. Герценштейн и Константинов, 1975). Иногда такие замечания имеют форму примеров, которым трудно дать какую-либо разумную интерпретацию. Например, Фирц и Йост (1965) построили пример псевдориманова многообразия в форме двумерного тора, которое является геодезически неполным. Это значит, что пробные частицы в таком мире живут лишь конечное собственное время, хотя ничего заслуживающего названия сингулярности в этом пространстве-времени нет или, по крайней мере, мы не умеем ее опознать.

Результаты

В данной работе мы специально рассмотрим еще одно темное место ОТО и космологии, связанное с глобальным строением космологических моделей. В отличие от упомянутых ранее темных мест, которые обычно не включают в учебники, этот вопрос изложен, скажем, в фундаментальной книге Ландау и Лифшица (1967), однако при этом на вопросе не заостряется внимание. Речь идет о том, что в замкнутой космологической модели полный электрический заряд равен нулю. Это, конечно, является непосредственным следствием теоремы Гаусса, которая, как показывает анализ, применима и в ОТО: полный заряд пропорционален потоку электрического поля через бесконечно удаленную поверхность. Поскольку в закрытой модели нет бесконечности, то обращается в нуль поток, а с ним и полный заряд.

Логически этот вывод не содержит противоречий. Возможно, что он даже хорошо согласуется с современными построениями в теории ранней Вселенной, в которой заряженные частицы возникают парами и естественно полагать, что полный заряд Вселенной равен нулю. Однако принятие подобной точки зрения в полном объеме представляет собой серьезный разрыв с привычными физическими представлениями. Мы вынуждены сказать, что в замкнутой космологической модели даже мысленно нельзя себе представить электрическое поле уединенного заряда, а мы вынуждены рассматривать поле пары зарядов, когда-то родившихся вместе, а с тех пор как-то разошедшихся в пространстве. Эта рекомендация совершенно нереализуема в практическом плане, а здравый смысл подсказывает, что поведение уединенного электрона странно связывать со строением Вселенной как целого.

Настораживает и то, что подобная проблема возникает только в закрытом мире, а в открытом мире эта трудность не возникает. Совершенно не помогает делу и желание рассматривать уединенный электрон как пробную частицу и не учитывать его вклад в формирование космологической модели. С другой стороны, настаивать на том, что один нескомпенсированный заряд электрона мог бы кардинально изменить топологическое строение Вселенной, без нужды не хочется.

Настораживает и то, что, скажем, электродинамика в космологической модели с критической плотностью и плоским неограниченным пространственным сечением и в аналогичной модели с пространственным сечением в виде плоского тора должны трактоваться совсем по-разному. В самом деле, в первой из них есть пространственная бесконечность, а в другой она отсутствует.

Другим аспектом проблемы является то, что в замкнутой Вселенной исчезает понятие функции Грина (поскольку не бывает уединенных зарядов) и вместо нее придется рассматривать функцию, определяемую парой точечных частиц. Эта модификация теории является необходимой даже если мы примем гипотезу о том, что разделение зарядов возможно лишь в небольших областях пространства и, скажем, в масштабах Земли заряды полностью и в точности компенсированы.

Удручает и то, что проблема с функцией Грина возникает при рассмотрении локальных задач, не имеющих никакого отношения к космологической проблеме. На эту трудность до определенной степени указывал Докур, 1971.

Вполне возможно, что все эти следствия в будущем найдут свое экспериментальное подтверждение. Однако элементарная осторожность рекомендует сначала проверить, нельзя ли так подправить теорию, чтобы устранить настораживающие обстоятельства. Оказывается, такая возможность действительно есть. Для того, чтобы ее выявить, постараемся понять, что приводит к изучаемой проблеме. По-видимому то, что электромагнитное поле и четырехмерный вектор тока рассматриваются в виде тензорного и векторного полей на четырехмерном искривленном пространстве-времени. Сами эти объекты находятся в касательном пространстве к многообразию, но компоненты, как это и должно быть в римановой геометрии, являются функциями координат на многообразии.

Соответственно, в релятивизированных уравнениях Максвелла фигурируют производные по координатам на пространстве-времени. Поэтому если релятивистская версия уравнений Максвелла содержит теорему Гаусса (а от этого никак не хотелось бы отказываться), то обсуждаемая трудность неизбежна.

В момент формулировки общей теории относительности геометрия не предоставляла других возможностей. Однако сейчас геометрия предлагает конструкцию касательного расслоения, суть которой состоит в следующем.

Не станем переносить уравнения Максвелла в искривленное пространство, а оставим их обычными уравнениями из специальной теории относительности. Для того, чтобы не отказаться при этом от ОТО, будем считать, что эти уравнения выписываются в каждой точке пространства-времени, а фигурирующие в них векторные и тензорные поля зависят от двух наборов четырехмерных переменных, (x^μ, y^ν) . Привлекательность такого поступка состоит в том, что и теорема Гаусса сохраняется, и у пространства, в котором эта теорема записывается, граница не исчезает и ничего нового по сравнению со специальной теорией относительности не происходит по определению. Эта конструкция, собственно, и называется касательным расслоением.

Трудности этого подхода тоже очевидны – нужно что-то сделать с избыточными переменными – однако они выглядят преодолимыми. Для их преодоления нужно связать координаты в касательном пространстве (y^ν) и на многообразии (x^μ). Для этого разработано понятие экспоненциального отображения.

Пусть мы фиксировали точку $x^\mu = x^\mu_0$ и хотим сопоставить точке y^ν некоторую точку x^μ_1 . Для этого из точки x^μ_0 выпускаются геодезическая в направлении вектора y^μ_0 и на ней откладывается расстояние (интервал), равный длине (интервалу) вектора y^μ_0 . Понятие экспоненциального отображения разработано для случая римановой геометрии (Громол и др. 1971). Для псевдориманова случая, интересного в общей теории относительности, при построении этого отображения возникает проблема с изотропными геодезическими, интервал на которых равен нулю.

В этом случае следует выбрать один из касательных векторов к изотропной геодезической в касательном пространстве точки x^μ_0 и использовать его для построения геодезического параметра как на многообразии, так и в касательном пространстве и отождествить точки с одним значением геодезического параметра. При этом, очевидно, построенное соответствие не зависит от выбора изотропного вектора также, как соответствие для неизотропных геодезических не зависит от выбора единицы длины.

Экспоненциальное отображение не зависит от системы координат и далее мы опускаем координатные индексы у переменных.

Экспоненциальное отображение порождает связь между векторными, тензорными и другими полями в точке x_0 и в точке u касательного пространства точки x_0 . Для этого мы должны рассматривать в касательных пространствах не просто свободные векторы, а векторы, снабженные точкой приложения. Можно сказать по-другому: мы начинаем рассматривать в качестве касательного пространства не векторное, а аффинное пространство. Этот поступок вполне вписывается в рамки современной геометрии.

Используя экспоненциальное отображение, можно перенести физические величины с многообразия в касательные пространства. Выписав теперь уравнения Максвелла в каждом из касательных пространств, мы получаем семейство уравнений Максвелла, связанных друг с другом с помощью экспоненциального отображения, в построении которого участвует метрика, а следовательно и гравитация. В рамках такого построения уравнения Эйнштейна выписываются не в касательном пространстве, а по-прежнему на самом многообразии.

В принципе, намеченный подход можно было бы детализировать и получить решения подобных уравнений в каких-то частных случаях. К сожалению, имеющиеся наблюдательные факты и факты, появление которых разумно ожидать в обозримом будущем, не дают для этого повода. Поэтому мы ограничимся обсуждением того, как в рамки этой схемы вписывается нетривиальная топология сопутствующего пространства и всего пространства-времени.

Экспоненциальное отображение не обязательно является взаимно-однозначным и одной пространственно-временной точке может соответствовать несколько, даже бесконечно много точек на касательном пространстве. Если пространство-время имеет неевклидову топологию, то это неизбежно. Однако даже если пространство-время устроено как евклидово пространство, то геодезические, исходящие из заданной точки, могут пересекаться и экспоненциальное отображение может терять взаимную однозначность. Именно это и происходит в гравитационных линзах. В результате один и тот же заряд, находящийся на пространстве-времени, изображается на касательном пространстве в виде целой системы зарядов. Однако ничто не мешает нам рассматривать вклад каждого из этих изображений в электромагнитное поле по отдельности, строить функцию Грина и производить другие стандартные операции. Даже если условие идеального равенства нулю полного заряда пространственно замкнутой Вселенной действительно имеет место, оно не должно учитываться на каждом шагу при исследовании локальных электрических полей, а учитывается лишь на уровне суммирования отдельных вкладов.

Подчеркнем еще раз, что с точки зрения сегодняшней практики решения конкретных физических задач, учитывающих общерелятивистские эффекты, никому и не приходит в голову, например, учитывать строение Вселенной как целого при обсуждении свойств данной черной дыры. Другими словами, предлагаемый подход достаточно вписывается в практику реальных исследований по общей теории относительности.

Кажется, что предлагаемый подход открывает и иную возможность. Можно построить математическую конструкцию, в которой место касательного пространства занимает пространство состояний квантовой механики. В этом случае место экспоненциального отображения должно занять некоторое отображение пространства состояний, ассоциированного с точкой x_0 , в пространство состояний, ассоциированного с точкой x_1 . Это отображение может описывать роль гравитационного поля в квантовой физике.

Рассмотрим предлагаемый подход на конкретном примере. Пусть в замкнутом фридмановском мире в пространственной точке A находится единичный отрицательный заряд (скажем, электрон), который покоится относительно системы отсчета, связанной с реликтовым излучением. Будем рассматривать точку A как полюс сферы и обозначим противоположный полюс через B . С точки зрения стандартной общей теории относительности в сферическом пространстве должен существовать еще один заряд, на этот раз единичный положительный (скажем, позитрон), причем местоположение этого заряда A' , вообще говоря, никак не связано с местоположением первого заряда и никак не задано для наблюдателя, изучающего первый заряд. Тем не менее, для того, чтобы изучать электрическое поле первого заряда, мы должны учитывать второй заряд. В этом, собственно, и состоит рассматриваемая трудность.

В предлагаемом подходе трудность обходится определенной релятивизацией понятия электрического заряда. Для наблюдателя, связанного с точкой А и изучающего ее касательное пространство, возможно рассмотрение одного изолированного заряда, находящегося в этой точке. При этом в касательном пространстве силовые линии электрического поля уходят на бесконечность и не возникает проблем с теоремой Гаусса. Если на самом деле все электрические заряды во Вселенной скомпенсированы, то их суммарное электрическое поле, которое только и представляет физический интерес, такое же, как в ОТО. Однако теперь мы, по крайней мере мысленно, имеем возможность рассмотреть и электрическое поле нескомпенсированного заряда. Для того, чтобы не усложнять без нужды ситуацию, допустим, что этот заряд единственный и внесен во Вселенную из какого-то внеположенной ей физической реальности.

Тогда силовые линии электрического поля, спроектированные на риманово пространственное сечение, снова сойдутся в противоположном полюсе сферы В. Для наблюдателя, находящегося в этой точке и изучающего соответствующее касательное пространство, заряд, причем не отрицательный, а положительный, находится в точке В. Для наблюдателя же, внесшего заряд в нашу Вселенную и оперирующего ей как целым, наряду с отрицательным зарядом, внесенным в точку А, в точке В спонтанно появляется положительный электрический заряд и полный заряд Вселенной снова равен нулю.

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что анализируемая проблема в основаниях общей теории относительности позволяет предположить, что на уровне рассмотрения, оперирующем Вселенной как элементом более обширного ансамбля (а такие схемы, пусть на уровне смелого полета мысли, появляются в современной науке), понятия наблюдателя и электрического заряда могут расщепиться на несколько и проявить еще одну ступень релятивизации.

Обратим также внимание на еще одну родственную задачу. Пусть мы внесли отрицательный электрический заряд в фокус F_1 гравитационной линзы. Часть силовых линий электрического поля, исходящие из этого фокуса, снова собираются во втором фокусе F_2 и их конфигурация соответствует паре положительного и отрицательного заряда, находящимся бесконечно близко от F_2 . Если линза не идеальна, то вблизи F_2 возникает заряженный конденсатор, а следовательно и поляризация вакуума. Если бы мы могли проводить физические эксперименты с гравитационными линзами, то проведение эксперимента с поляризацией вакуума представляло бы несомненный интерес. В реальности нам доступно в лучшем случае наблюдение гравитационных линз и традиционно считается, что нескомпенсированными электрическими зарядами в астрономии можно пренебрегать. Однако электрический заряд, скажем, Земли равен нулю все же приближенно, а не точно. Не исключено, что какие-то эффекты, связанные с нескомпенсированными электрическими зарядами можно усмотреть и в наблюдениях гравитационных линз.

Примечания:

1. Герценштейн М.Е., Константинов Ю.Н., 1975; в сб. Проблемы теории гравитации и элементарных частиц, Т. 6, М., Атомиздат. С. 23.
2. Громол Д., Клингенберг В., Мейер В., Риманова геометрия в целом. М.: Мир, 1971.
3. Докуп, 1971; Dautcourt G., Gen. Relat. Gravit. V. 2. P. 97.
4. Клейн, 1919; Klein F., Proc. K. Akad. Wet. Amst. V. 21. P. 614.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Теория поля, Наука, М., 1967.
6. Лашез-Рей и Люмине, 1995; Lachieze-Rey M., Luminet J.-P., Phys. Rep. V. 254. P. 135.
7. Соколов Д.Д., 2002; Астрон. журн. Т. 79. С. 579.
8. Соколов Д.Д., 2003; Астрон. журн., Т. 80б 1059-1963.
9. Фирц и Йост, 1965; Firz M., Jost R., Helv. Phys. Acta V. 38. P. 778.

References:

1. Gertsenshtein M.E., Konstantinov Yu.N., 1975; v sb. Problemy teorii gravitatsii i elementarnykh chastits, T. 6, M., Atomizdat. S. 23.
2. Gromol D., Klingenberg V., Meier V., Rimanova geometriya v tselom. M.: Mir, 1971.

3. Dokur, 1971; Dautcourt G., Gen. Relat. Gravit. V. 2. P. 97.
4. Klein, 1919; Klein F., Proc. K. Akad. Wet. Amst. V. 21. P. 614.
5. Landau L.D., Lifshits E.M., Teoriya polya, Nauka, M., 1967.
6. Lashez-Rei i Lyumine, 1995; Lachieze-Rey M., Luminet J.-P., Phys. Rep. V. 254. P. 135.
7. Sokolov D.D., 2002; Astron. zhurn. T. 79. S. 579.
8. Sokolov D.D., 2003; Astron. zhurn., T. 80b 1059-1963.
9. Firts i Iost, 1965; Firz M., Jost R., Helv. Phys. Acta V. 38. P. 778.

УДК 523.11

Электрический заряд в закрытой космологической модели

Дмитрий Дмитриевич Соколов ^{a, *}

^a Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация

Аннотация. В рамках стандартной общей теории относительности полный электрический заряд в замкнутой космологической модели в точности обращается в нуль. Это значит, что даже гипотетически нельзя рассматривать электрическое поле уединенного заряда, строить функцию Грина и т.д. В работе указана возможность некоторой модификации ОТО, которая допускает подобные операции. Идея модификации основана на конструкциях экспоненциального отображения и касательного расслоения.

Ключевые слова: электрический заряд, закрытая космологическая модель.

* Корреспондирующий автор
Адреса электронной почты: sokoloff.dd@gmail.com (Д.Д. Соколов)