

Модификация сверхпроводниковой ленты YBCO(123) при пропускании транспортного тока при $T = 77$ К

Б. П. Аксенов, Л. Х. Антонова, Е. И. Демихов,
Е. А. Костров, А. П. Менушенков, Г. Н. Михайлова,
С. В. Покровский, И. А. Руднев, А. В. Троицкий

Изучено влияние длительного пропускания постоянного тока через прямолинейный образец композитной ленты второго поколения на основе высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) YBCO(123) — $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ — при $T = 77$ К ($I = 0,7 I_c$ в течение 300 ч и $I = 1,3 I_c$ в течение 100 ч). Если в первом случае значение критического тока не изменилось, то в последнем случае, когда ток пропускали через образец в смешанном состоянии, обнаружено уменьшение критического тока, как в нулевом поле, так и в магнитных полях до 10 Тл. Сканирующая холловская магнитометрия, примененная для изучения токонесущей способности ленты и исследования структурных дефектов в образцах, позволила обнаружить макроскопический дефект, возникший в образце после токовой перегрузки. Экспериментальные результаты интерпретируются в рамках представления о ионно-электронном характере проводимости соединения YBCO(123) для нормальной фазы.

Ключевые слова: ВТСП, YBCO(123), лента второго поколения, критический ток, ионная проводимость, токовые перегрузки, смешанное состояние, деградация.

The influence of long-duration of a direct current transport through a straightforward sample of a composite tape on the basis of a high-temperature superconductor YBCO (123) was studied at $T = 77$ K ($I = 0,7 I_c$ during 300 h and $I = 1,3 I_c$ during 100 h). If in the first case the value of critical current has not changed, that in the latter case, when the current was passed through a sample at the mixed state, the reduction of a critical current is revealed both at a zero field, and at magnetic fields up to 10 T. Scanning Hall magnetometry applied for studying of carried-current ability of a tape and researching of structural defects in samples, has allowed to find out the microscopic defect which has arisen in a sample after current overload. The experimental results are interpreted within the framework of representation about the mixed character of electric conductivity of YBCO(123) at a normal phase.

Key words: high-temperature superconductivity, YBCO (123), 2-G, a tape, critical current, ionic conductivity, current overload, mixed state, degradation.

Введение

Купратные ВТСП имеют высокую критическую температуру, что делает их чрезвычайно перспективными для применения в электроэнергетике при температуре жидкого азота и выше. Однако кристаллохимические свойства оксидных ВТСП имеют особенности — они разрушаются под действием воды, углекислого газа и многих других факторов. Термоциклизирование — одно из наиболее хорошо изученных явлений для ВТСП-материалов, приво-

дящее к снижению критического тока. Смешанный характер проводимости и существенная доля ионной проводимости в нормальном состоянии у большинства ВТСП-материалов — еще один важный фактор, определяющий поведение проводов из ВТСП-материалов в электрических цепях [1]. Как было показано в [2, 3], в ВТСП-керамиках в сверхпроводящем состоянии может происходить распад фазы при протекании тока, как в твердых электролитах. Теоретический анализ показал, что этот процесс может быть связан с электростимулированной

диффузией ионов и характерен для сверхпроводников с *d*-спариванием, а также с наличием посторонних примесей в сверхпроводящей фазе [4, 5].

В настоящее время, когда прошло более 20 лет после открытия нового класса сверхпроводников, прогресс в технологиях привел к тому, что ряд известных мировых компаний предлагает длинномерные изделия из купратных ВТСП, главным образом на базе материалов YBCO(123) ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$), DyBCO(123) ($\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$), BSCCO(2212) ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-x}$) и BSCCO(2223) ($(\text{Bi},\text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$).

Впечатляющие результаты были получены в недавние годы, когда были созданы так называемые ленточные провода второго поколения ($2 - G$), которые изготавливают на гибкой подложке с применением полупроводниковых технологий, а именно нанесение сверхпроводниковой пленки осуществляется электронным лучом или с помощью химического осаждения (metal-organic chemical vapor deposition — MOCVD).

Очевидно, что проблема стабильности, долговременной надежности и большого ресурса работы проводов на базе ВТСП становится ключевой при создании сильноточных кабелей, соленоидов, трансформаторов, электродвигателей и других устройств электротехники. В последние годы на тему надежности и стабильности критического тока ВТСП-проводов появляется все больше работ [6–9].

Цель данных исследований — изучение надежности и стабильности параметров (критической температуры и критического тока) YBCO(123) ВТСП-проводов второго поколения, выпускаемых компанией SuperPower, США, для определения ресурса их работы в жидким азоте при длительном пропускании транспортного тока в диапазоне 0,7–1,3 от критического значения. Ранее аналогичные исследования проведены нами для лент, содержащих другие ВТСП [8, 9]. Предварительные результаты данной работы были доложены на конференции ФПС-08 [10].

Материалы и методика эксперимента

Исследовали прямолинейные образцы коммерческой ленты на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ($x = 0-0,3$) марки SCS 4050 размером $110 \times 4 \times 0,1$ мм³ с критическими параметрами: плотность критического тока $J_c = 2 \cdot 10^6$ А/см² (при $T = 77$ К) и критическая температура $T_c = 92$ К (рис. 1). Указанная лента YBCO(123) представляет собой многослойный композит, состоящий из пленки сверхпроводника толщиной 1 мкм, полученной распылением электронным лучом на подложку из немагнитного сплава хастеллой С 276 с несколькими буферными слоями нанометровой

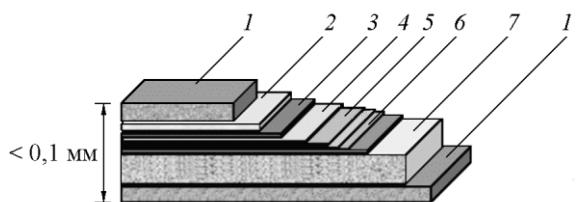


Рис. 1. Схематическое объемное изображение сверхпроводящей композитной ленты второго поколения на основе YBCO(123) [10]. 1 — медь, 20 мкм; 2 — серебро, 2 мкм; 3 — сверхпроводник YBCO(123), 1 мкм; 4–6 — буферные слои, состоящие из эпитаксиальных диэлектрических пленок; 7 — подложка из сплава Хастеллой, 50 мкм; Общая толщина ленты $\leq 0,1$ мм.

толщины для создания биаксиальной текстуры сверхпроводящего материала и повышения гибкости ленты. Сверху пленка сверхпроводника покрыта слоем серебра толщиной 2 мкм. Для защиты от механических повреждений, уменьшения потерь на переменном токе, герметизации и стабилизации по току лента YBCO(123) покрыта медной оболочкой толщиной 20 мкм [11].

Токонесущие свойства сверхпроводника изменили четырехзондовым методом по вольт-амперным характеристикам в нулевом поле и в магнитных полях до 10 Тл и с помощью сканирующей холловской магнитометрии.

Перед проведением эксперимента по длительному пропусканию транспортного тока было проведено термоциклизирование образцов. Оказалось, что после трех термоциклов критический ток образца указанной ленты падает не более чем на 1,3%.

В опытах использовали два идентичных образца: Y1 — экспериментальный, через который пропускали транспортный ток; Y2 — контрольный — находился в криостате с жидким азотом продолжительное время без тока и подвергался термоциклизированию, так же как экспериментальный образец. Токовые контакты образца Y1 — прижимные с дополнительной проплойкой индия. Потенциальные контакты позволяли контролировать наличие сверхпроводящего состояния в образце Y1. Критические параметры образца Y1 до пропускания тока были следующие: критический ток — $I_c = 73$ А, критическая температура — 92 К. Через образец Y1 пропускали транспортный ток 50 А ($\sim 0,7 I_c$), и время от времени снимали вольт-амперные характеристики $U(I)$. Такая величина пропускаемого тока была выбрана исходя из того, что приблизительно таким является рабочий ток сверхпроводящих соленоидов.

Результаты и обсуждение

Вольт-амперные характеристики $U(I)$ экспериментального образца Y1, снятые в различное время после включения транспортного тока $I_{tr} \sim 0,7 I_c$, представлены на рис. 2.

Через 300 ч пропускания транспортного тока 0,7 I_c величина критического тока I_c осталась неизменной, хотя форма вольт-амперной характеристики оказалась несколько иной по сравнению с исходной. Критическая температура у обоих образцов (экспериментального и контрольного) не изменилась — 92 К.

После этого было исследовано влияние сверхкритического тока на ВТСП-ленту. Хотя обычно сверхпроводящие устройства не эксплуатируются на таких токах, в аварийных ситуациях возможно их протекание по сверхпроводнику. Величина транспортного тока в образце Y1 была увеличена до 95 А, что составляет 1,3 I_c , и ток пропускался еще 100 ч (сверхпроводник находился в смешанном состоянии). Величина тока 1,3 I_c была выбрана из соображений гарантированного отсутствия перегрева ВТСП-ленты. Специально контролировали тепловой режим образца в жидким азоте. Перегрева образца выше 77 К зафиксировано не было. Через 100 ч снимали вольт-амперную характеристику четырех-зондовым методом, которая показала, что критический ток в образце уменьшился на 3% при $H=0$ (рис. 2, кривая 5).

Здесь необходимы пояснения. В исследованной композитной стабилизированной ВТСП ленте имеется четыре токопроводящих слоя: медь — толщиной

40 мкм, хастеллой — 50 мкм, серебро — 2 мкм и сверхпроводник YBCO(123) — 1 мкм (рис. 1). При токе в 95 А (выше критического значения) падение напряжения на образце при 77 К составляло 2 мВ. Отсюда можно вычислить эффективное сопротивление структуры $R^* = U/I = 21$ мкОм. Оценка удельного сопротивления структуры $\rho^* = (R \cdot S)/l$, где S — суммарное сечение проводника, l — расстояние между потенциальными контактами, дает величину 0,047 мкОм·см, что много меньше удельного сопротивления меди — 0,18 мкОм·см (77 К). Это значит, что сверхпроводник, находящийся в смешанном состоянии, шунтирует все другие токопроводящие слои ленты, и ток идет в основном по YBCO(123).

Оценим Джоулево тепло, выделяемое при пропускании тока $Q = I^2 R_0$, где $I = 95$ А, а R_0 — сопротивление всей ленты (имеется в виду расстояние между токовыми контактами 70 мм) — 82,25 мкОм. Тогда получим величину $Q = 0,74$ Вт. В кипящем жидким азоте таким теплопритоком можно пренебречь, то есть перегрева при токе 95 А быть не может.

Холловская магнитометрия

Детальное исследование образцов Y1, Y2 было проведено с помощью сканирующей холловской магнитометрии. Суть метода заключается в том, что датчик Холла фиксирует непосредственно величину локального магнитного поля вблизи поверхности ВТСП-образца, предварительно намагниченного во внешнем магнитном поле. Перемещая датчик Холла в двух направлениях, проводится сканирование и запись значения магнитного потока по всей исследуемой поверхности. Из полученных данных с помощью численного решения задачи инверсии закона Био-Савара в рамках модели Бина можно определить критический ток в различных точках исследуемого образца [12, 13].

Основа экспериментального стенда — полупроводниковый датчик Холла, расположенный на двухкоординатном манипуляторе. В работе использовали преобразователь Холла, имеющий следующие характеристики: размер преобразователя — $2 \times 1,5 \times 0,6$ мм³, размер рабочей зоны датчика — $0,45 \times 0,15$ мм², магнитная чувствительность — 64 мкВ/мГл.

На рис. 3 представлено пространственное распределение критического тока в образцах Y1, Y2. В первом случае (рис. 3а) на объемном изображении пространственного распределения критического тока в образце после токовой перегрузки наблюдается макроскопический структурный дефект, связанный, по нашему мнению, с изменением фазового состава сверхпроводника.

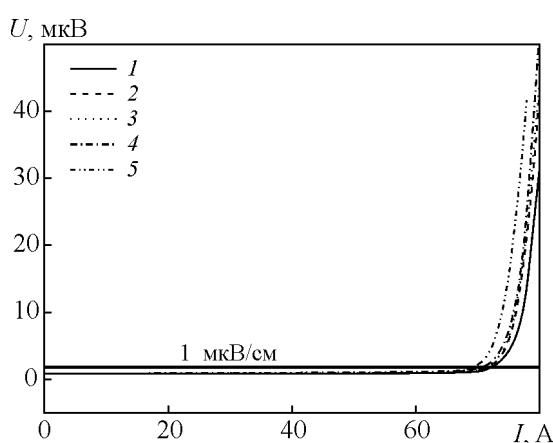


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики образца сверхпроводящей композитной ленты ВТСП на основе YBCO(123) до (1) и после пропускания тока 50 А через 100 (2), 200 (3) и 300 ч (4), $I_c = 72,5$ А. Кривая 5 — через 100 ч пропускания тока 95 А.

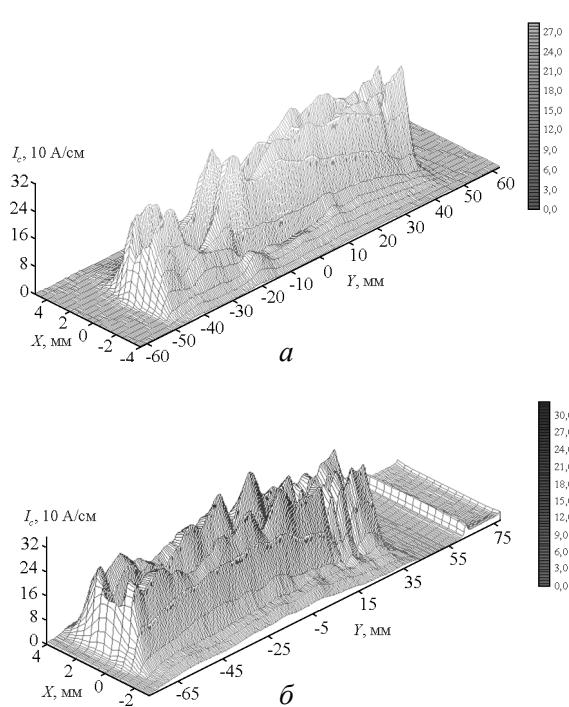


Рис. 3. Распределение критического тока в образцах Y1 (a), Y2 (б), полученное методом сканирующей холловской магнитометрии.

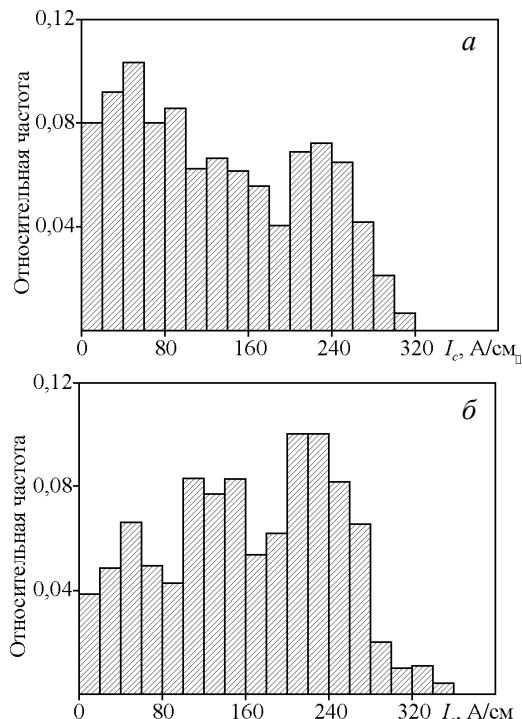


Рис.4. Номограмма пространственного распределения критических токов сверхпроводящего образца: a — Y1 после токовой перегрузки (компьютерная обработка рис. 3а), б — Y2 без тока (компьютерная обработка рис. 3б).

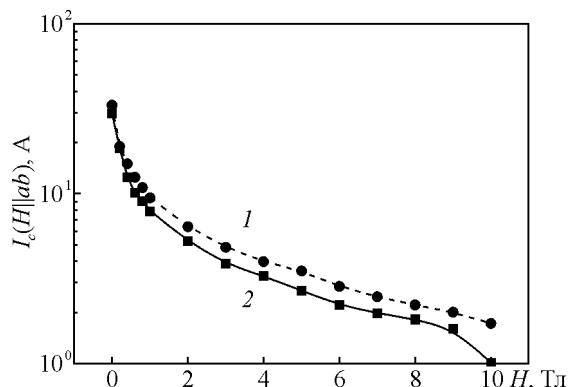


Рис. 5. Зависимость критического тока от величины магнитного поля в ориентации $H \parallel ab$ для токового Y1 (2) и контрольного Y2 (1) образцов.

Компьютерная обработка изображений на рис. 3 представлена на рис. 4 в виде номограмм значений критического тока для экспериментального и контрольного образцов, из которых следует, что токонесущие свойства сверхпроводника, после длительного пропускания тока выше критического на 30% ухудшаются, что подтверждается также измерениями критического тока в этом образце (рис.2, кривая 5).

На рис. 5 представлена зависимость величины критического тока образцов Y1 и Y2 от внешнего магнитного поля $I_c(H)$ для ориентации магнитного поля $H \parallel ab$ (плоскость ab сверхпроводника YBCO(123) параллельна подложке). Видно, что во всем интервале магнитных полей до 10 Тл критический ток контрольного образца Y2 выше, чем образца Y1, через который пропускали ток.

Выводы

Таким образом, экспериментальные исследования долговременной стабильности критического тока в лентах второго поколения, изготовленных по эпитаксиальным технологиям на основе YBCO(123) (SuperPower Inc., США), указывают на то, что в них не происходит заметных изменений величины критического тока при пропускании транспортного тока ($I_{tr} = 0,7 I_c$) в течение 300 ч в сверхпроводящем состоянии.

В то же время вольт-амперные характеристики, и данные по холловской магнитометрии, и измерения зависимости $I_c(H)$ указывают на ухудшение токонесущей способности ленты в результате токовых перегрузок.

Высокая стабильность критических параметров изученных проводов (T_c, I_c) при пропускании тока в

сверхпроводящем состоянии при температуре жидкого азота является безусловно большим достижением современных технологий высокотемпературных сверхпроводников.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (09-08-00430, 08-02-00759) и гранта аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы” (2.1.1/2479).

Литература

1. Осилюн Ю.А., Николаев Р.К., Сидоров Н.С., Бобров В.С., Цой В.С. Термоэлектрический домен в Y – Ba – Cu – O керамике и её аналогах. Письма в ЖЭТФ, 1988, т. 47, вып. 5, с. 257 – 260.
2. Прохоров А.М., Гуфан Ю.М., Крапивка А.Е., Лубнин Е.Н., Михайлова Г.Н., Рудашевский Е.Г., Сеферов А.С., Сумароков В.Н., Тарасенков. В.А., Чистов А.Г. Перемещение тяжелых ионов в ВТСП типа Y – Ba – Cu – O при 4,2 К и сверхпроводящий ток. Письма в ЖЭТФ, 1990, т. 51, вып. 3, с. 132 – 134.
3. Лубнин Е.Н., Михайлова Г.Н., Оськина Т.Е., Прохоров А.М., Сеферов А.С., Троицкий А.В. Электростимулированное изменение химического состава ВТСП пленок $(\text{BiPb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ при 4,2 К. Доклады Академии наук СССР, 1993, т. 332, № 6, с. 303 – 305.
4. Mikhailova G.N., Prokhorov A.M., Shchurova L.Yu, Troitskii A.V. Electrostimulated diffusion of ions in HTSC and the current states in d-type superconductors. Physica C, 2004, v. 408 – 410, p. 692 – 693.
5. Михайлова Г.Н., Прохоров А.М., Щурова Л.Ю., Троицкий А.В. Перемещение ионов в ВТСП и природа токонесущего состояния в сверхпроводниках d-типа. Неорганические материалы, 2000, т. 36, № 8, с. 969 – 978.
6. Bae D.K., Lee S.J., Bae J.H., Sim K.D., Park K.Y., Ko T.K. Electrical degradation of a high- T_c superconductor by continuous current transport. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2003, v. 13, no. 2, p. 2949 – 2952.
7. Wang X, Banba S., Ueda H., Ishiyama A., Iigima Y., Saitoh T., Kashima N., Mori M., Watanabe T., Nagaya S., Katoh T., Machi T., Shiohara Y. Degradation of YBCO coated conductors caused by over-current pulses. Journal of Physics: Conference Series, 2008, v. 97, 012150, p. 1 – 6.
8. Demikhov E.I., Aksenen V.P., Zherikhina L.N., Kostrov E.A., Mikhailova G.N., Mikhailov V.S., Troitskii A.V., Tshovrebov A.M.. Study of reliability of the HTS tapes in electrical circuit at 77 K. Journal of Physics: Conference Series, 2008, v. 97, 012321, p. 1 – 5.
9. Михайлова Г.Н., Демихов Е.И., Аксенов В.П., Антонова Л.Х., Исхакова Л.Д., Михайлов В.С. , Жерихина Л.Н., Костров Е.А., Лаврищев С.И., Троицкий А.В., Цховребов А.М. Долговременная стабильность сверхпроводящей ленты на основе $\text{Bi}(2223)$ и $\text{Dy}(123)$ в цепи постоянного тока. Журнал Технической физики, 2009, т. 79, вып. 2, с. 72 – 75.
10. Троицкий А.В., Аксенов В.П., Антонова Л.Х., Михайлова Г.Н., Демихов Е.И., Жерихина Л.Н., Костров.Е.А., Цховребов А.М. Высокая стабильность критического тока ВТСП проводов на основе Y-123 и Dy-123 при длительном пропускании электрического тока при 77 К. Сборник трудов 3-й Международной конференции “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости.” (ФПС’08) 2008. Москва, ФИАН, 2008, с. 286 – 287.
11. Официальный сайт компании SuperPower Inc.(USA). <http://www.superpower-inc.com> (дата обращения 30.06.09)
12. Подливаев А.И., Руднев И.А., Покровский С.В. Восстановление распределения двумерного тока в сверхпроводящей ленте по ее магнитному полю, измеряемому с использованием преобразователей холла. Инженерная физика, 2007, №5, с. 18 – 25.
13. Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Podlivaev A.I. A two-dimensional current mapping in superconducting tapes. Journal of Physics: Conference Series, 2009, v. 150, 052211, p. 1 – 4.

Аксенов Валерий Павлович — Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики низких температур, сверхпроводимости. E-mail: aksenov@kapella.gpi.ru.

Антонова Ландыш Халифовна — Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Специалист в области физики низких температур, сверхпроводимости. E-mail: lraa@kapella.gpi.ru.

Демихов Евгений Иванович — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом. Специалист в области физики низких температур, сильных магнитных полей. E-mail: demikhov@lebedev.ru.

Костров Евгений Александрович — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, аспирант. E-mail: kostrov@lebedev.ru.

Менушенков Алексей Павлович — Московский инженерно-физический институт, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, декан. Специалист в области радиационной физики сверхпроводников.

Михайлова Галина Николаевна — Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией. Специалист в области физики низких температур, сверхпроводимости. E-mail: galina@kapella.gpi.ru.

Покровский Сергей Владимирович — Московский инженерно-физический институт, аспирант. E-mail: sergeyopokrovskii@gmail.com.

Рудnev Игорь Анатольевич — Московский инженерно-физический институт, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой. Специалист в области радиационной физики сверхпроводников. E-mail: IARudnev@MEPHI.RU.

Троицкий Алексей Владимирович — Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики низких температур, сверхпроводимости. E-mail: at@kapella.gpi.ru.