

А.Г. Шепелев

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков

75 лет ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ОТКРЫТИЮ ЯВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ II-го РОДА (ФАЗЫ ШУБНИКОВА)*



Шубников с соавторами сделали решающий эксперимент и правильно его интерпретировали.

Из доклада Т. Берлинкорта [1] на Симпозиуме, посвященном 75-летию открытия сверхпроводимости (США, 1986 г.)

Освещены основные факты на пути, которым прошли ученые Криогенных лабораторий мира до открытия в 1936г. в Украинском физико-техническом институте (УФТИ) явления сверхпроводимости II-го рода (фазы Шубникова). Перечислены основополагающие результаты, представлены оценки явления крупнейшими специалистами в области сверхпроводимости, кратко обсуждается роль этого явления в науке и технике.

Ключевые слова: сверхпроводники II-го рода, фаза Шубникова, магнитные системы.

В июне 1936 года в Специальном выпуске журнала «Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion» была опубликована статья сотрудников Украинского физико-технического института *Л.В. Шубникова, В.И. Хоткевича, Г.Д. Шепелева, Ю.Н. Рябинина* «Магнитные свойства сверхпроводящих металлов и сплавов», поступившая в редакцию журнала 11 апреля 1936 года [2]. Издание этого номера было приурочено к VI Международному конгрессу по холоду (Гаага, 1936 г.), где работавший в то время в Криогенной лаборатории Л.В. Шубникова немецкий специалист *М. Руэмани* распространил среди участников Конгресса эту публикацию и сделал доклад об указанной работе, поскольку *Л.В. Шубникову* власти не разреша-

ли выезжать за рубеж. Лев Васильевич очень ценил эту работу, и она была направлена в печать в том же 1936 г. не только в текущий номер «Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion» [3], но и в ЖЭТФ [4]. В юбилейном выпуске УФЖ (2008 г., т. 53), приуроченном к 90-летию НАН Украины и посвященном вкладу ученых Украины в Золотой фонд мировой науки, указанная статья была переиздана на английском языке [5].

Результаты рассматриваемой статьи давно признаны экспериментальным открытием явления сверхпроводимости II-го рода (см., напр., [6]). Заметим, что практически все сверхпроводники, открытые за последние 50 лет, начиная с Nb_3Sn и до купратов, фуллеренов, MgB_2 , систем на основе железа, являются сверхпроводниками II-го рода.

В течение последних 45 лет теория сверхпроводимости II-го рода подробно излагалась во многих обзорах и монографиях. Но непрос-

* Доклад на Юбилейной конференции Украинского физического общества 18 февраля 2011 г. (Киев).

той путь, который прошли экспериментаторы пяти Криогенных лабораторий мира до открытия сверхпроводимости II-го рода в Харькове в 1936 г. [2–4, 7], мало кому известен, т.к. освещался в печати крайне фрагментарно.

Следует отметить, что на протяжении двух десятилетий после открытия явления сверхпроводимости *Х. Камерлинг-Оннесом* (Лейден, 1911 г.) оно рассматривалось только с точки зрения отсутствия электрического сопротивления металла. Правда, еще в 1924 г. Нобелевский лауреат *Х. Лоренц* [8] обратил внимание на магнитные свойства чистых сверхпроводников.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЧИСТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Первые работы по исследованию влияния магнитного поля на электрическое сопротивление чистых сверхпроводников выполнялись в лаборатории Камерлинга-Оннеса начиная с 1914 г. [9, 10–13]. Было обнаружено, что при достижении магнитным полем критической величины H_c сверхпроводимость резко разрушается. Наиболее четкие результаты были получены *В. де Гаазом* и *Й. Воогдом* при изучении монокристаллического чистого олова [13]. Оказалось, что в то время как разрушение сверхпроводимости чистого металла в продольном магнитном поле (размагничивающий фактор $n = 0$) происходит скачкообразно, когда оно достигает критического значения H_c , разрушение в поперечном поле (при $n = 1/2$) происходит постепенно, начиная примерно с $H_c / 2$ и заканчивается при H_c . В то время еще не существовало представлений о промежуточном состоянии чистых сверхпроводников, созданных *Л.Д. Ландау* [14, 15], которое вызывало это отличие. Однако эксперименты де Гааза, Воогда [13] привлекли внимание Нобелевского лауреата *М. Лайэ* [16] к магнитным свойствам чистых сверхпроводников: в случае отсутствия электрического сопротивления в идеальном проводнике отсутствует электрическое поле даже при протекании электрического

тока. Второе уравнение Максвелла для электромагнитного поля приобретает вид

$$\frac{dB}{dt} = -c \operatorname{rot} E = 0.$$

Следовательно, внутри идеального проводника не может быть изменений магнитной индукции B . Это означает, что при размещении такого проводника в изменяющемся магнитном поле на поверхности проводника наводятся поверхностные токи, достаточные для поддержания в нем индукции неизменной.

Необычные магнитные свойства чистых сверхпроводников были независимо обнаружены экспериментально разными методами *В. Мейсснером*, *Р. Оксенфельдом* [17] в Берлине и *Ю.Н. Рябининым*, *Л.В. Шубниковым* [18] в Харькове. Оказалось, что магнитное поле в чистый сверхпроводник не проникает (естественно, за исключением приповерхностного слоя глубиной λ) и магнитная индукция в нем $B = 0$, т.е. чистый сверхпроводник является *идеальным диамагнетиком*. При достижении полем величины H_c (в случае, когда $n = 0$) происходит скачкообразное изменение индукции и намагничивания $M = (B - H) / 4\pi$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СПЛАВОВ

Влияние магнитного поля на электрическое сопротивление сверхпроводящих сплавов начали изучать в лаборатории Х. Камерлинга-Оннеса. Здесь в 1929–1931 гг. *В. де Гааз* и *Й. Воогд* [19–21] исследовали ряд поликристаллических сплавов (Bi-Tl , Pb-Tl , Sn-Sb , Pb-Hg), включая и эвтектические (Sn-Bi , Sn-Cd , Pb-Bi , Au-Bi), и обнаружили значительные отличия в поведении сплавов в магнитном поле от поведения чистых сверхпроводников. *Во-первых*, было показано, что разрушение сверхпроводимости сплавов магнитным полем происходит не скачкообразно при H_c (как это имеет место в чистых сверхпроводниках при $n = 0$), а в широком интервале магнитного поля, независимо от ориентации поля. *Во-вто-*

рых, критические поля полного разрушения сверхпроводимости сплавов оказались, в ряде случаев, гораздо больше, чем у чистых сверхпроводников, а значения dH_c/dT велики. Авторы совершенно справедливо отметили, что поскольку эвтектики представляют собой смесь двух фаз, одна из них могла шунтировать весь образец при измерении электрического сопротивления. Что касается других изученных сплавов, то отличие их поведения от чистых сверхпроводников авторы объяснили наличием неоднородностей в образцах. Поскольку в начале XX в. не все фазовые диаграммы сплавов были хорошо известны, большинство исследуемых образцов сплавов, как выяснилось позже, к сожалению, были неоднородными, следовательно, неоднородными.

Исследования магнитных свойств сверхпроводящих сплавов в магнитном поле, начатые в 1934–1935 гг. в 4-х из 5-ти Криогенных лабораторий мира, работавших в то время при температурах жидкого гелия, показали, что свойства сплавов существенно отличаются от свойств чистых сверхпроводников. Канадские ученые *Ф. Тарр* и *Дж. Вильгельм* (университет в Торонто) в сентябре 1934 г. обнаружили, что в то время как в образце чистой ртути эффект Мейсснера полностью выполнялся, в поликристаллах многофазных сплавов Pb–Sn и Bi–Pb–Sn он вообще не наблюдался («замороженный магнитный поток» [22]). В статье английских ученых *Т. Килли*, *К. Мендельсона*, *Дж. Мура* из Оксфордского университета, направленной в печать в октябре 1934 г., было установлено, что в поликристаллах сплавов Pb–Bi, Sn–Cd и Sn–Bi разрушение сверхпроводимости происходит не при определенном значении магнитного поля, а зачастую растягивается на интервал 10–20 % от H_c [23].

Наиболее четкие результаты доложили нидерландские ученые *В. де Гааз* и *Ю. Казимир-Йонкер* из Лейденского университета на заседании Королевской Академии (Амстердам) в декабре 1934 г. [24]. Непосредственными измерениями магнитного потока, проникающего

внутри поликристаллических образцов Pb–Tl и Bi–Tl, они показали, что до определенного значения внешнее магнитное поле в образец не проникает, а при дальнейшем его увеличении наблюдается постепенное проникновение магнитного потока в сплав (рис. 1, а). Таким образом, оказалось, что сверхпроводящий сплав характеризуется *тремя магнитными полями*: полем начала проникновения; полем, где наблюдаются первые признаки изменения электрического сопротивления при разрушении сверхпроводимости, и полем полного разрушения сверхпроводимости (рис. 1, б). Статьи об этом эффекте были направлены авторами в печать в начале декабря 1934 г. [25, 26].

В январе 1935 г. *Ю.Н. Рябинин* и *Л.В. Шубников* (УФТИ) направили в печать статьи, подтвердившие указанный эффект [27, 28]. В статьях авторы ввели общепринятое теперь обозначение $H_{к1}$ и $H_{к2}$ (в английской транскрипции H_{c1} и H_{c2}) для поля начала проникновения и поля полного разрушения сверхпроводимости соответственно.

Отметим, что вышеуказанные отличия электрических и магнитных свойств сверхпроводящих сплавов по сравнению с чистыми сверхпроводниками все исследователи объясняли неоднородностями изучаемых образцов. Наиболее четкое выражение этот факт нашел в гипотезе «*губки Мендельсона*», предложенной в апреле–мае 1935 г.: предполагалось, что наличие в сверхпроводящих сплавах неоднородностей состава, структуры и внутренних напряжений вызывает образование многосвязной тонкой структуры с аномально высокими критическими полями, которые служат токовыми путями [29, 30]. Достаточно привести цитату из монографии *В.Л. Гинзбурга* «Сверхпроводимость» (под ред. *Л.Д. Ландау*) [31]: «Свойства сверхпроводников сильно зависят от примесей, натяжений и различных неоднородностей их состава и структуры. Свойства сплавов, в которых эти неоднородности реально всегда присутствуют, существенно отличаются от свойств чистых сверхпроводников».

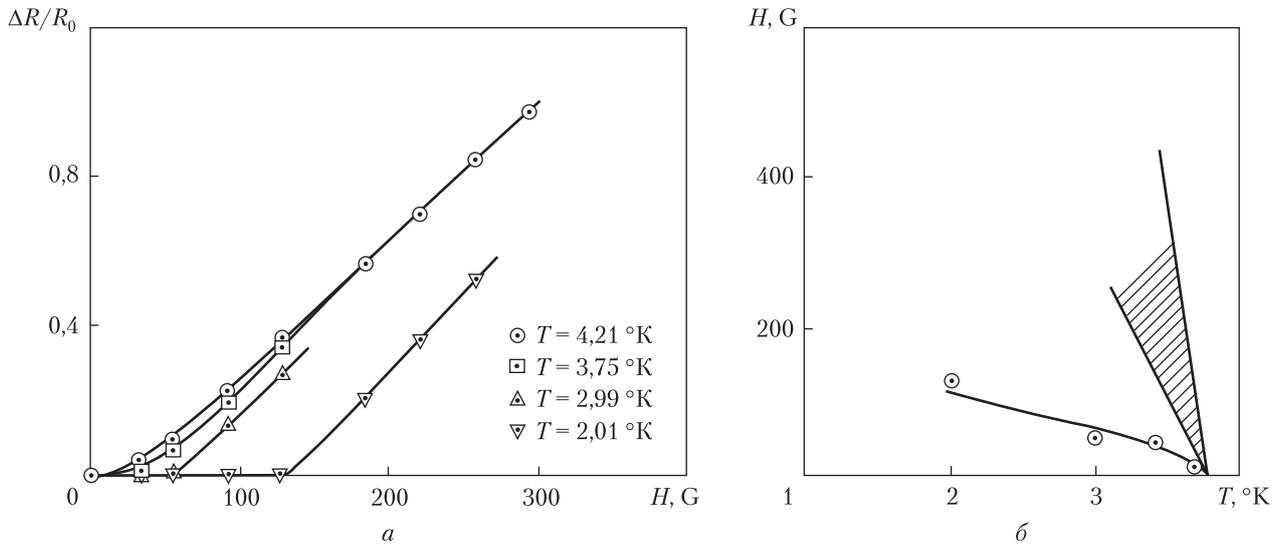


Рис. 1. Проникновение поперечного магнитного поля в цилиндрический поликристалл сверхпроводящего сплава Pb–Tl при указанных температурах. Кривая при 4,2 К получена в нормальном состоянии (а). Температурная зависимость величины начала проникновения магнитного поля в сверхпроводящий сплав Pb–Tl. Заштрихованная область – постепенное проникновение по данным измерения электрического сопротивления (б)

Интересно, что в том же 1935 г. *К. Гортер* [32] и *Г. Лондон* [33] теоретически рассмотрели поведение сверхпроводящих сплавов в магнитном поле в отсутствие неоднородностей. Было показано, что сплавы при этом разбиваются на чередующиеся сверхпроводящие/нормальные слои, параллельные приложенному магнитному полю. Выяснилось, что при толщине сверхпроводящих слоев, меньшей глубины проникновения поля λ , их критические поля велики.

Однако ни «губка Мендельсона», ни теории Гортера и Лондона не могли объяснить проникновение магнитного поля в сверхпроводящий сплав при $H < H_c$. Тем не менее гипотеза «губки Мендельсона» использовалась в научной литературе около 25-и лет для объяснения свойств сверхпроводящих сплавов; позже она была признана ошибочной [1, 34–36].

ОТКРЫТИЕ ЯВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ II-го РОДА

Шубников, Хоткевич, Шепелев, Рябинин [2–4] сообщили результаты детального исследования монокристаллов однофазных сплавов

Pb–Tl и Pb–In, тщательно отожженных при предплавильной температуре. Ими впервые было обнаружено, что:

- ✦ в сверхпроводящих сплавах существует граница по концентрации примеси, до которой их магнитные свойства подобны магнитным свойствам чистых сверхпроводников (полный эффект Мейсснера при полях, меньших критических, и резкое разрушение сверхпроводимости при дальнейшем увеличении магнитного поля) (рис. 2);
- ✦ с увеличением концентрации примеси за эту границу (в рамках современных представлений – с ростом параметра Гинзбурга–Ландау $\kappa = \lambda/\xi$, где λ – глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник, а ξ – длина когерентности между электронами в куперовских парах) магнитные свойства сплавов резко отличаются от свойств чистых сверхпроводников. Эффект Мейсснера существует только до магнитного поля H_{k1} , и при дальнейшем увеличении поля сплавы остаются сверхпроводящими до H_{k2} , но при этом магнитное поле посте-

пенно проникає в сплав. На рис. 3, 4 приведені результати вимірювань для сплавів Pb–Tl при різній концентрації приміси. Аналогічні результати були отримані і для двох сплавів Pb–In.

Сплави Pb–Tl і Pb–In можуть розглядатися як модельні при дослідженні сверхпроводників II-го роду, т.к. в них існує широка область твердого розчину (по концентрації приміси), стабільного до низьких температур, що дозволяє вивчати концентраційні ефекти. Л. Шубников з колегами [2–4] встановили, що:

1) при збільшенні концентрації приміси (т.е. з ростом параметра α) інтервал між $H_{к1}$ і $H_{к2}$ розширюється: $H_{к1}$ зменшується, а $H_{к2}$ зростає (рис. 5);

2) різниця вільної енергії намагніченого і нормального сверхпроводника дається площею кривої $\Delta F = \int MdH$, де M – намагніченість, а різниця ентропії визначається похідною $\Delta S = -(\delta F / \delta T)_B$. Підрахунок різниці ентропій, виконаний авторами для сплавів, показав, що в цьому випадку (так же, як і в випадку чистих сверхпроводників) – це величини одного порядку, подібним чином залежачі від температури. По тому скачок теплоємності ΔC при сверхпроводячому переході в нульовому магнітному полі для сплаву порівняємо з таким для чистого сверхпроводника. Це знаходилося в протиріччі з теорією для сплавів [37–40], заснованою на прямій пропорційності між ΔC і $(dH_c / dT)^2$, що добре узгоджувалося з результатами незалежних експериментальних досліджень [41, 42];

3) незвичайні властивості сверхпроводячих сплавів не можуть бути пояснені гістерезисними явищами, оскільки в великих збільшуваних і зменшуваних полях явище добре відтворюється, а гістерезис малий;

4) рентгенове дослідження вивчаємих сплавів показало, що вони є однофазними. Це протиріччю твердженням авторів всіх попередніх робіт (числом більше

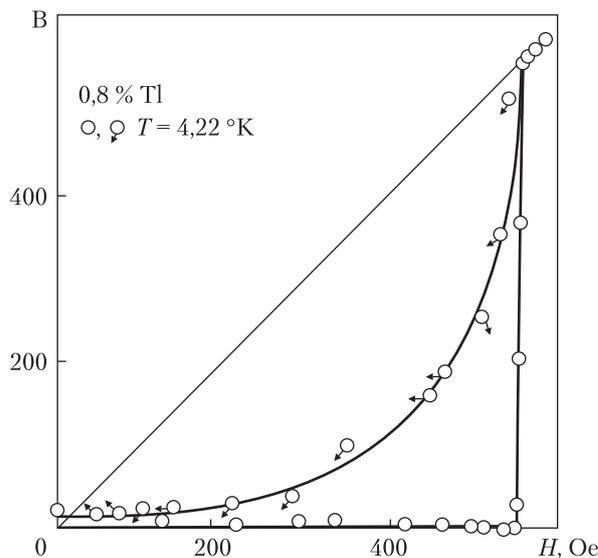


Рис. 2. Залежність індукції від продольного магнітного поля для довгого циліндричного монокристала сплаву Pb + 0,8 % Tl

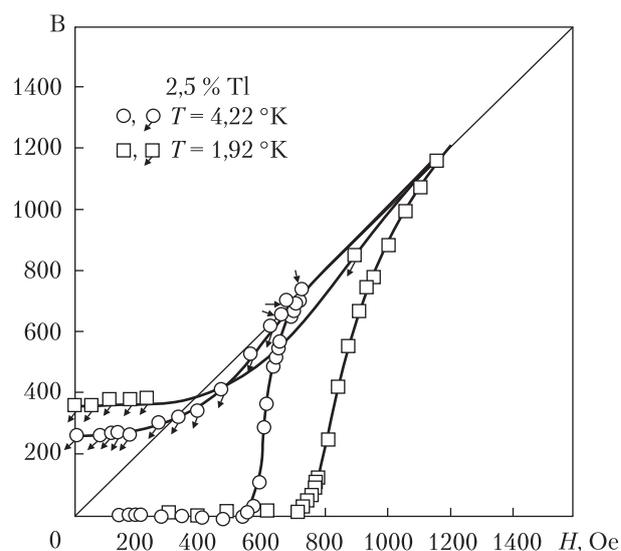


Рис. 3. Залежність індукції від продольного магнітного поля для довгого циліндричного монокристала сплаву Pb + 2,5 % Tl

двоєї) 4-х Криогенних лабораторій світу, що сверхпроводячі властивості сплавів обумовлені наявністю неоднорідностей.

Следовательно, саме в розглянутих роботах Шубникова, Хоткевича, Шепелева, Ря-

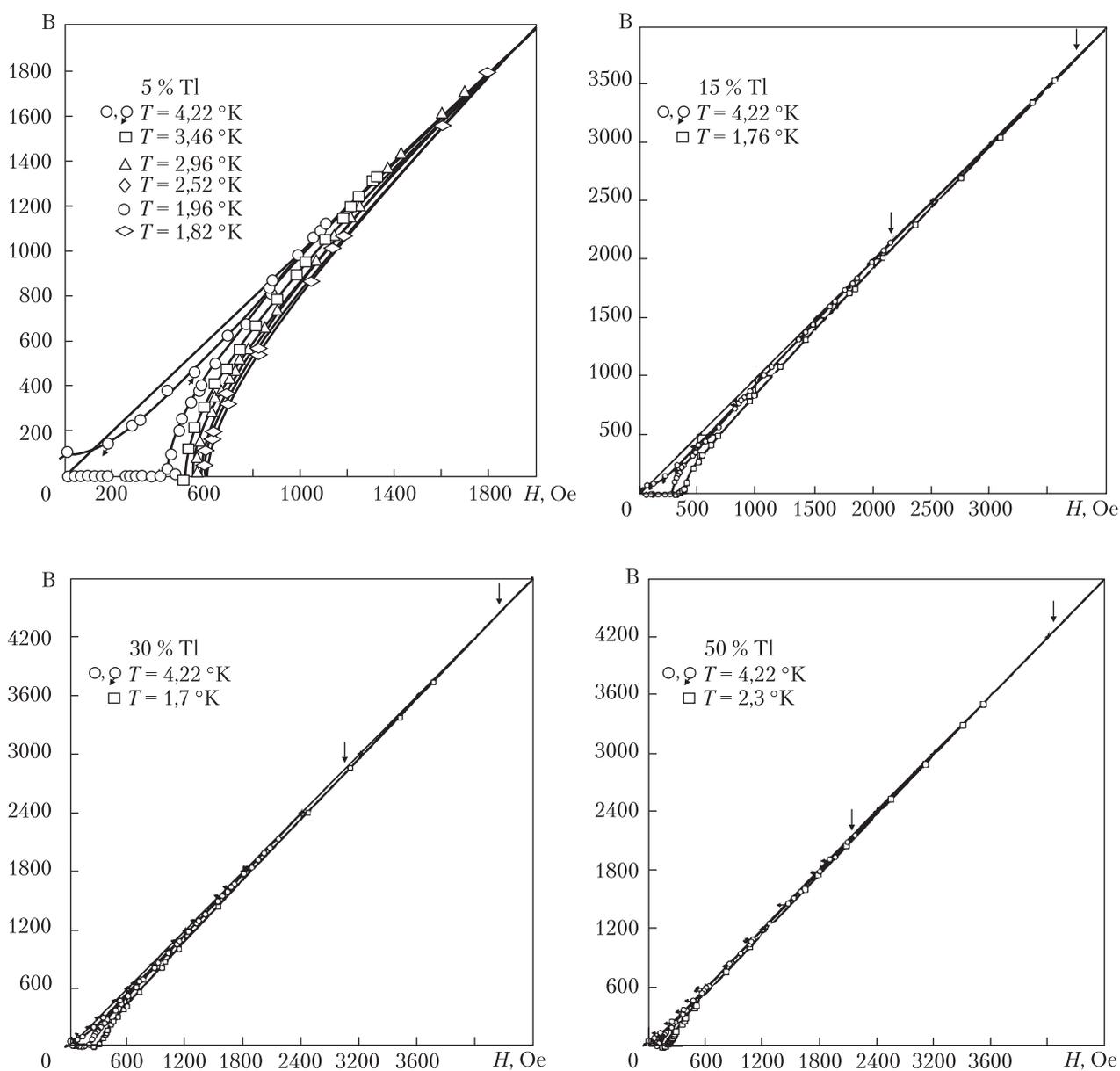


Рис. 4. Зависимость индукции от продольного магнитного поля для длинных цилиндрических монокристаллов сплавов Pb + 5 % Tl; Pb + 15 % Tl; Pb + 30 % Tl; Pb + 50 % Tl

бинина [2–4] был сделан обоснованный и правильный вывод о существовании нового типа сверхпроводников — сверхпроводников II-го рода, свойства которых кардинально отличаются от свойств сверхпроводников I-го рода. Диссертация Г.Д. Шепелева [7], выполненная в Криогенной лаборатории Л.В. Шубникова в

1934–1937 гг., является первой диссертацией в мире по тематике сверхпроводимости II-го рода.

Несмотря на то, что публикации Шубникова с сотрудниками [2–4] стали сразу известны за рубежом [43–48], (Э. Бартон и др. [46] из Канады, а также Л. Джексон [45] и К. Менделсон [47] из Англии ссылались именно на Спе-

циальный выпуск «Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion» [2]), пионерская работа группы Шубникова сильно опередила время и ее значимость была оценена только спустя четверть века. Пожалуй, это неудивительно, и П.Л. Капица давно отметил: «...хорошо известно, что самые большие научные открытия... были оценены только спустя много лет» [49]. Удивительно то, что никто из зарубежных ученых, занимавшихся исследованиями сверхпроводимости и узнавших на VI Международном конгрессе по холоду (1936 г.) о результатах работы Шубникова с сотрудниками [2], не решился повторить или расширить эти исследования. Насколько нам известно, только в 1963 г. американский ученый Дж. Ливингстон [50] из Исследовательских лабораторий фирмы General Electric первым провел повторные измерения при 4,2 К магнитных свойств бинарных сверхпроводящих сплавов (включая Pb—Tl и Pb—In, ранее изучавшихся Шубниковым с сотрудниками [2–4] в широком температурном интервале), получив практически те же результаты. Несомненно, на своевременное признание открытия повлияли трагические события — арест и расстрел в 1937 г. Л.В. Шубникова необоснованным решением внесудебного органа «Двойки» в лице одиозных функционеров тоталитарного режима Наркома внутренних дел СССР Ежова и Прокурора СССР Вышинского, арест в 1938 г. Л.Д. Ландау в Москве, а также «железный занавес», холодная война и маккартизм в США, прервавшие творческое взаимодействие ученых разных стран.

Досадно, что Л.Д. Ландау, который находился в дружеских отношениях с Л.В. Шубниковым и обсуждал с ним все работы, которые велись в лаборатории Шубникова, не оценил, находясь в плену представлений «губки Менделсона», рассматриваемое открытие ни в 1936 г., ни через 14 лет, когда он вместе с В.Л. Гинзбургом создал феноменологическую теорию сверхпроводимости [51]. В этой теории вводился параметр упорядочения Ψ , а также параметр Гинзбурга—Ландау κ , и было показано, что

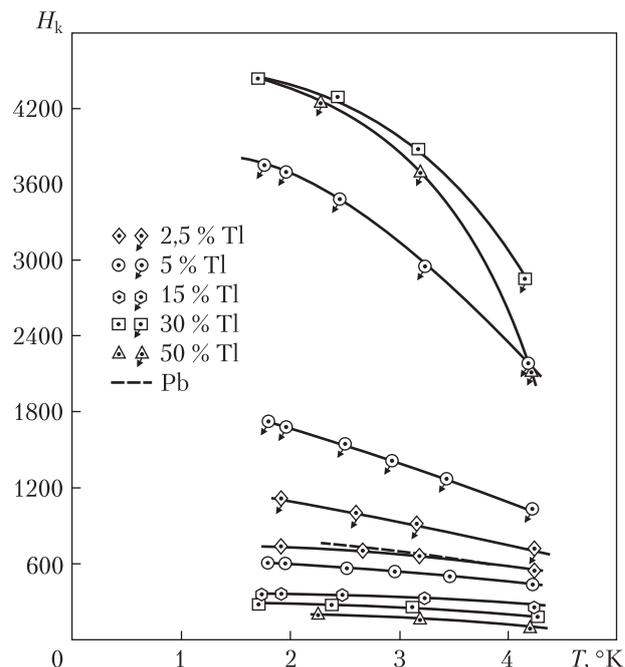


Рис. 5. Температурная зависимость H_{k1} и H_{k2} для монокристаллов сплавов Pb—Tl указанных концентраций и H_c для монокристалла чистого свинца

критическое значение последнего $\kappa_c = 1 / \sqrt{2}$, когда межфазная поверхностная энергия $\sigma_{ns} = 0$. К сожалению, авторы рассмотрели только случай, когда $\kappa < \kappa_c$ и $\sigma_{ns} > 0$, т.е. сверхпроводники I-го рода. В.Л. Гинзбург в Нобелевской лекции [52] отметил, что по отношению к сверхпроводящим сплавам в то время «понимание ситуации отсутствовало, и Ландау и я, как и многие другие, считали что сплавы — «грязное дело» и не интересовались ими, ограничившись материалами с $\kappa < \kappa_c$, для которых $\sigma_{ns} > 0$, т.е. сверхпроводниками I-го рода». Почти через 20 лет после создания теории Гинзбурга—Ландау [51] американский ученый Б. Чандрасекхар в авторитетном двухтомнике «Superconductivity» [53] со ссылкой на работу Шубникова с сотрудниками [4] подчеркнул «что наиболее яркое применение теории Гинзбурга—Ландау — это описание сверхпроводников II-го рода».

Первый теоретический анализ работы Шубникова с сотрудниками [4] содержался в из-

вестной статье А.А. Абрикосова 1957 г. [54], который на основе теории Гинзбурга—Ландау [51, 55] и экспериментальных результатов Шубникова с сотрудниками [4] построил теорию сверхпроводимости II-го рода. Им было выяснено, что в области между $H_{к1}$ и $H_{к2}$ магнитный поток проникает в сверхпроводящий сплав в виде вихревой структуры, состоящей из тонких трубок потока размерами ξ (что определяется отрицательной межфазной поверхностной энергией), а не в форме слоев, как предлагалось в теориях Гортера [32] и Лондона [33]. Каждая трубка несет квант магнитного потока

$$\Phi_0 = \frac{hc}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb},$$

при этом вокруг каждой трубки в слое толщиной λ циркулирует незатухающий сверхпроводящий ток. Заметим, что слоистая структура реализуется под действием магнитного поля в промежуточном состоянии сверхпроводников I-го рода [14, 15].

А.А. Абрикосов показал, что в то время как в сверхпроводниках I-го рода разрушение сверхпроводимости магнитным полем происходит по механизму фазовых переходов I-го рода, в сверхпроводниках II-го рода имеет место фазовый переход II-го рода, в соответствии с результатами работ Шубникова с сотрудниками [4]. Было установлено также, что термодинамическое критическое поле сплава H_c примерно равно среднему геометрическому полей $H_{к1}$ и $H_{к2}$:

$$\frac{H_c}{H_{к1}} \approx \frac{H_{к2}}{H_c} \approx \sqrt{2} \cdot \alpha.$$

Следовательно, чем больше величина параметра Гинзбурга—Ландау α , тем меньше $H_{к1}$ и тем больше $H_{к2}$, что находится в согласии с экспериментальными результатами Шубникова с сотрудниками (см. рис. 5). А.А. Абрикосов в Нобелевской лекции [56] подчеркнул: «Я сравнил теоретические предсказания относительно кривых намагничивания с экспериментальными данными для сплава Pb—Tl, полученными

Львом Шубниковым и его сотрудниками в 1937 г. [4]. Согласие оказалось очень хорошим».

ПРИЗНАНИЕ ОТКРЫТИЯ

Всемирное признание открытия Шубникова с сотрудниками [2—4] произошло на Международной конференции по сверхпроводимости (США, 1963 г.), где авторитетные авторы из Нидерландов, Англии, Франции и США К. Гортер [57, 58], К. Мендельсон [59], Б. Гудман [34], Т. Берлинкорт [35] в своих докладах по достоинству оценили это открытие. Председатель конференции Дж. Бардин и секретарь конференции Р.В. Шмитт [60] подвели итог: «Следует отметить, что наше теоретическое понимание сверхпроводников II-го рода в основном связано с Ландау, Гинзбургом, Абрикосовым и Горьковым, а первые определяющие эксперименты были проведены еще в 1937 г. Шубниковым».

Интересный комментарий к работам Шубникова с сотрудниками [2—4] был дан К. Мендельсоном, классиком физики низких температур и автором гипотезы «губка Мендельсона»: «Сделать однородный сплав без дефектов решетки исключительно трудно. Из всех групп, занятых низкотемпературными исследованиями в тридцатых годах, группа Л.В. Шубникова в Харькове имела, очевидно, наилучший комплекс знаний в области металлургии» [61].

Единственный дважды Нобелевский лауреат по физике Дж. Бардин [6] в докладе на Конференции «Сверхпроводимость в науке и технике» (1966 г., США) отметил: «Явление было открыто экспериментально русским физиком Шубниковым [4] около 1937 г.». Еще один Нобелевский лауреат Ф. Андерсон [62], обсуждая роль теоретической статьи А. Абрикосова и экспериментальных результатов Л. Шубникова с сотрудниками, указал: «Западу почти полностью не удалось оценить эту статью, также как и данные Шубникова [4], которые она объяснила, в то время как они вместе обосновали и практически завершили науку о сверхпроводимости II-го рода». Известно, что Нобелевский лауреат де Женн в книге [63] ввел понятие «фа-

за Шубникова» для описання состояния сверхпроводников между $H_{к1}$ и $H_{к2}$, широко применяемое ныне в литературе.

Необходимо упомянуть о четком мнении по обсуждаемому вопросу Нобелевского лауреата В.Л. Гинзбурга [64], высказанном в докладе на Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (Москва, 2004 г.): «Л.В. Шубников с учениками и коллегами всего за несколько лет успел сделать очень много, особенно нужно упомянуть исследования сверхпроводящих сплавов и фактическое открытие сверхпроводников II-го рода. Уверен, что Шубников добился бы еще многих других успехов в науке, тем горше думать о его безвременной (в возрасте всего 36-и лет!) и совершенно безвинной гибели под топором сталинского террора».

Сверхпроводники II-го рода уже сейчас широко применяются в различных отраслях науки и техники. Ни одна крупная магнитная система (напр., Большой адронный коллайдер, в котором используется более 10 000 сверхпроводящих магнитов [65], а также Международный термоядерный реактор (ИТЭР) [66]) не могут быть созданы без сверхпроводников II-го рода. Можно не сомневаться, что в дальнейшем такие сверхпроводники найдут еще более широкое применение.

Автор выражает признательность Шубниковскому профессору Д. Ларбаллисту, директору Центра прикладной сверхпроводимости США за любезно предоставленную возможность ознакомиться с редактируемой им XI главой выходящей из печати книги о 100-летию открытия явления сверхпроводимости [67] и за высокую оценку, данную им в этой главе обзорной статье автора по обсуждаемому вопросу [68].

ЛИТЕРАТУРА

1. Berlincourt T.G. Type II superconductivity: quest for understanding // IEEE Trans. Magnetics. — 1987. — V. MAG-26, № 2. — P. 403–412.
2. Schubnikow L.W., Chotkewitsch W.I., Schepelew J.D., Rjabinin J.N. Magnetische Eigenschaften supraleitender Metalle und Legierungen // Sondernummer Phys. Z. Sowjet.

Arbeiten auf dem Gebiete tiefer Temperaturen, Juni 1936. — 1936. — S. 39–66.

3. Schubnikow L.W., Chotkewitsch W.I., Schepelew J.D., Rjabinin J.N. Magnetische Eigenschaften supraleitender Metalle und Legierungen // Phys. Z. Sowjet. — 1936. — Bd. 10, H.2. — S.165–192.
4. Шубников Л.В., Хоткевич В.И., Шенелев Ю.Д., Рябинин Ю.Н. Магнитные свойства сверхпроводящих металлов и сплавов // ЖЭТФ. — 1937. — Т. 7, № 2. — С. 221–237.
5. Shubnikov L.V., Khotkevich V.I., Shepelev Yu.D., Riabinin Yu.N. Magnetic properties of superconducting metals and alloys // Ukrainian J. Phys. — 2008. — V. 53, Special Issue. — P. 42–52.
6. Bardeen J. Theory of superconductivity. In: Superconductivity in Science and Technology (ed. M.H.Cohen), Chicago & London: University of Chicago Press. — 1968. — P. 4.
7. Шенелев Г.Д. Магнитные свойства сверхпроводящих сплавов, Дисс. канд. физ.-мат. наук, Инв. № 379-Д, ХГУ, 1938, 61 с.
8. Lorentz H.A. On the motion of electricity in a spherical shell placed in a magnetic field // Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden. — 1924. — Suppl. № 50b. — P. 35–40.
9. Kamerlingh Onnes H. The appearance of the resistance in superconductors, which are brought into a magnetic field, at a threshold value of the field // *ibid.* — 1914. — № 139f. — P. 65–71.
10. Tuyn W., Kamerlingh Onnes H. The disturbance of superconductivity by magnetic field and currents. The hypothesis of Silsbee // *Ibid.* — 1926. — V. 16, № 174 a. — P. 3–39.
11. Sizoo G.J., De Haas W.J., Kamerlingh Onnes H. Measurements on the magnetic disturbance of the superconductivity with tin. 1. Influence of elastic deformation. 2. Hysteresis phenomena // *Ibid.* — 1926. — V. 16, № 180c. — P. 29–53.
12. De Haas W.J., Sizoo G.J., Kamerlingh Onnes H. Measurements on the magnetic disturbance of the superconductivity with mercury // *Ibid.* — 1926. — V. 16, № 180d. — P. 57–103.
13. De Haas W.J., Voogd J. The magnetic disturbance of the superconductivity of single-crystal wires of tin // *Ibid.* — 1931. — V. 19, № 212c. — P. 29–36.
14. Ландау Л.Д. К теории сверхпроводимости // ЖЭТФ. — 1937. — Т. 7, № 3. — С. 371–378.
15. Ландау Л.Д. К теории промежуточного состояния сверхпроводников // *Ibid.* — 1943. — Т. 13, № 11–12. — С. 377–387.
16. Laue M.V. Zur Deutung einiger Versuche über Supraleitung // Phys.Z. — 1932. — Bd. 33, No. 21. — S. 793–796.
17. Meissner W., Ochsenfeld R. Ein neuer Effekt bei Eintritt der supraleitfähigkeit // Naturwiss. — 1933. — Bd. 33, No. 44. — S. 787–788.

18. *Rjabinin J.N., Schubnikow L.W.* Verhalten eines Supraleiters im magnetischen Field // *Phys.Z.Sowjet.* — 1934. — Bd.5, H.4. — S. 641—643.
19. *De Haas W.J., Voogd J.* Disturbance of the superconductivity of the compound Bi_5Tl_3 and of the alloys Sn-Bi and Sn-Cd by magnetic field // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1929. — № 199c. — P. 31—40.
20. *De Haas W.J., Voogd J.* The influence of magnetic fields on superconductors // *Ibid.* — 1930. — № 208b. — P. 9—20.
21. *De Haas W.J., Voogd J.* Further investigations on the magnetic disturbance of the superconducting state of alloys // *Ibid.* 1931. — № 214b. — P. 9—16.
22. *Tarr F.G.A., Wilhelm J.O.* Magnetic effects in superconductors // *Canad. J. Research.* — 1935. — V. 12, № 1. — P. 265—271.
23. *Keeley T.C., Mendelssohn K., Moore J.R.* Experiments on supraconductors // *Nature.* — 1934. — V. 134, № 3394. — P. 773—774.
24. *De Haas W.J., Casimir-Jonker J.M.* Penetration of magnetic field into superconductive alloys // *Proc. Roy. Acad. Amsterdam, Proc. Sec. Sci.* — 1935. — V. 38, № 1. — P. 2—7.
25. *De Haas W.J., Casimir-Jonker J.M.* Penetration of magnetic field into superconductive alloys // *Nature.* — 1935. — V. 135, № 3401. — P. 30—31.
26. *De Haas W.J., Casimir-Jonker J.M.* Penetration of magnetic field into superconductive alloys // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1935. — V. 21, № 233c. — P. 1—7.
27. *Rjabinin J.N., Schubnikow L.W.* Magnetic properties and critical currents of superconducting alloys // *Phys. Z. Sowjet.* — 1935. — V. 7, № 1. — P. 122—125.
28. *Rjabinin J.N., Schubnikow L.W.* Magnetic properties and critical currents of superconducting alloys // *Nature.* — 1935. — V. 135, № 3415. — P. 581—582.
29. *Mendelssohn K., Moore J.R.* Surpa-conducting alloys // *Nature.* — 1935. — V. 135, № 3420. — P. 826—827.
30. *Mendelssohn K.* In Discussion on superconductivity and other low temperature phenomena // *Proc. Roy. Soc.* — 1935. — V. 152A, № 875. — P. 34—41.
31. *Гинзбург В.Л.* Сверхпроводимость. — М.: Изд-во АН СССР, 1946. — С. 23, 118.
32. *Gorter C.J.* Note on the supraconductivity of alloys // *Physica.* — 1935. — V. 2, № 1—12. — P. 449—452.
33. *London H.* Phase-equilibrium of supraconductors in a magnetic field // *Proc. Roy. Soc.* — 1935. — V. 152A, No. 875. — P. 650—663.
34. *Goodman B.B.* Type II or London superconductors // *Revs. Mod. Phys.* — 1964. — V. 36, No. 1, Pt. 1. — P. 12—19.
35. *Berlincourt T.G.* Type II superconductivity // *Ibid.* — P. 20.
36. *Morin F.J., Maita J.P., Williams H.J. et al.* Heat capacity evidence for a large degree of superconductivity in V_3Ga in high magnetic fields // *Phys.Rev.Letters.* — 1962. — V. 8, № 7. — P. 275—277.
37. *Ehrenfest P.* Phasenumwandlungen im üblichen und erweiterten Zinn, classifiziert nach den entsprechenden Singularitäten des thermodynamischen Potentials // *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden.* — 1933. — Suppl. No. 75b. — S. 13.
38. *Rutgers A.J.* Note on supraconductivity // *Physica.* — 1934. — V. 1, No. 10—11. — P. 1055—1058.
39. *Rutgers A.J.* Bemerkung zur Anwendung der Thermodynamik auf die Supraleitung // *Ibid.* — 1936. — V. 3, No. 9. — S. 999—1005.
40. *Gorter C.J., Casimir H.B.G.* On superconductivity // *Ibid.* — 1934. — V. 1, No. 4. — P. 306—320.
41. *Schubnikow L.W., Chotkewitsch W.I.* Spezifische Wärme von supraleitenden Legierungen // *Phys. Z. Sowiet.* — 1934. — V. 6, H. 3—4. — P. 605—607.
42. *Mendelssohn K., Moore J.R.* Specific heat of a superconducting alloy // *Proc. Roy. Soc.* — 1935. — V. 151A, № 873. — P. 334—341.
43. *Ruhemann M. and B.* Low Temperature Physics // Cambridge, University Press, 1937. — P. 274—275; 287—288; 313.
44. *Shoenberg D.* Superconductivity // Cambridge, University Press., 1938. — P. 79—86.
45. *Jackson L.C.* Superconductivity // *Repts. Progr. Phys.* — 1940. — V. 6. — P. 338.
46. *Burton E.F., Smith H.G., Wilhelm J.O.* Phenomena at the temperature of liquid helium // N.Y., Reinhold Publ. Corp. — 1940. — P. 307—310, 319.
47. *Mendelssohn K.* Superconductivity // *Repts. Progr. Phys.* — 1946. — V. 10. — P. 362—363.
48. *Shoenberg D.* Superconductivity (2nd ed.) // Cambridge, University Press. — 1952. — P. 41—44; *Д. Шенберг.* Сверхпроводимость. — М.: ИЛ. — 1955. — С. 47, 49.
49. *Есаков В.Д., Рубинин П.Е.* Капица, Кремль и наука. Т. 1. — М.: Наука, 2003. — С. 77.
50. *Livingston J.D.* Magnetic properties of superconducting lead — base alloys // *Phys.Rev.* — 1963. — V. 129, № 5. — P. 1943—1949.
51. *Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д.* К теории сверхпроводимости // *ЖЭТФ.* — 1950. — Т. 20, № 12. — С. 1064—1082.
52. *Ginzburg V.L.* On Superconductivity and Superfluidity (What I have and have not managed to do), As well as on the «Physical Minimum» at the beginning of the 21st century. In: T. Frängsnyr (Ed.) // *Les Prix Nobel. The Nobel Prizes 2003 (Nobel Foundation, Stockholm).* — 2004. — P. 103; *В.Л. Гинзбург.* О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о «Физическом минимуме» на начало XXI века // *УФН.* — 2004. — Т. 174, № 11. — С. 1244.
53. *Chandrasekhar B.S.* Early experiments and phenomenological theory. In: *Superconductivity (ed.R.D.Parks)* // Marcel Dekker Inc, N.Y. — 1969. — V. 1 — P. 43.

54. *Абрикосов А.А.* О магнитных свойствах сверхпроводников второй группы // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 32, № 6. — С. 1442–1452.
55. *Ginzburg V.L.* On the theory of superconductivity // Nuovo Cimento. — 1955. — V. 2, № 6. — P. 1234–1250.
56. *Абрикосов А.А.* Type II superconductors and the vortex lattice. In: T. Frängsnyr (Ed.) // Les Prix Nobel. The Nobel Prizes. — 2003. — Stockholm, Nobel Foundation. — 2004. — P. 65; *А.А. Абрикосов.* Сверхпроводники II рода и вихревая решетка // УФН. — 2004. — Т. 174, № 11. — С. 1238.
57. *Gorter C.J.* Superconductivity until 1940 in Leiden and as seen from there // Revs. Mod. Phys. — 1964. — V. 36, № 1. — Pt. 1. — P. 6.
58. *Gorter C.J.* Some remarks on superconductivity of the second kind // Ibid. — P. 27.
59. *Mendelssohn K.* Prewar work on superconductivity as seen from Oxford // Ibid. — P. 10.
60. *Bardeen J., Schmitt R.W.* International conference on the science of superconductivity // Ibid. — P. 2.
61. *Mendelssohn K.* The Quest for Absolute Zero. The Meaning of Low Temperature Physics // McGraw-Hill Book Company, N.Y. — 1966. — P. 209; *К. Мендельсон.* На пути к абсолютному нулю. Введение в физику низких температур. — М.: Атомиздат, 1971. — С. 188.
62. *Anderson P.W.* Superconductivity in past and future. In: Superconductivity (ed. R.D. Parks), N.Y., Marcel Dekker, Inc. — 1969. — V. 2. — P. 1347.
63. *De Gennes P.G.* Superconductivity of metals and alloys // W.A. Benjamin, Inc. N.Y., Amsterdam. — 1966 — Chapter 3; *П. де Жен.* Сверхпроводимость металлов и сплавов. — М.: Мир, 1968. — С. 54.
64. *Гинзбург В.Л.* Несколько замечаний об изучении сверхпроводимости // УФН. — 2005. — Т. 175, № 2. — С. 188.
65. *Rossi L.* Superconductivity: its role, its success and its setbacks in the Large Hadron Collider of CERN // Supercond. Sci. and Technol. — 2010. — V. 23, № 3. — P. 1–18.
66. *Salpietro E.* Status of the ITER magnets // Ibid. — 2006. — V. 19, № 3. — P. 84–89.
67. *Larbalestier D.* Wires and Tapes. In: 100 Years of Superconductivity (ed. P.H. Kes, H. Rogalla), L., Taylor & Francis, — 2011 (in press) — chapter XI.
68. *Shepelev A.G.* The discovery of type II superconductors (Shubnikov Phase) in: Superconductor (ed. A.M. Luiz). Rijeka, Sciyo. — 2010. — P. 17–46: <http://www.intechopen.com/books/show/title/superconductor>.

А.Г. Шепелев

75 РОКІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ
ВІДКРИТТЮ ЯВИЩА НАДПРОВІДНОСТІ
II-го РОДУ (ФАЗИ ШУБНІКОВА)

Освітлені основні факти на шляху, яким пройшли вчені Кріогенних лабораторій світу до відкриття в 1936 р. в Українському фізико-технічному інституті (УФТІ) явища надпровідності II роду (фази Шубнікова). Перераховані основні результати, наведені оцінки явища найбільшими фахівцями в області надпровідності, коротко обговорюється роль цього явища в науці й техніці.

Ключові слова: надпровідники II роду, фаза Шубнікова, магнітні системи.

A.G. Shepelev

75 YEARS OF THE EXPERIMENTAL DISCOVERY
OF THE TYPE II SUPERCONDUCTIVITY
(SHUBNIKOV PHASE)

The paper covers main facts of the way covered by the scientists of world cryogenic laboratories to the discovery of the type II superconductivity at the Ukrainian Scientific Research Institute for Physics and Technology (prior UFTI) in 1936. Basic results and appraisals of the discovery by the foremost authorities in the field of superconductivity are presented; the role of the phenomenon in present-day science and technology is briefly discussed.

Key words: type II superconductivity, Shubnikov phase, magnetic systems.

Стаття надійшла до редакції 01.04.11