

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**К 100-летию со дня рождения Н.Е. Алексеевского**

*Научная сессия Отделения физических наук  
Российской академии наук, 23 мая 2012 г.*

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302g.0207

23 мая 2012 г. в конференц-зале Института физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН, посвящённая 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Н.Е. Алексеевского.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН [www.gpad.ac.ru](http://www.gpad.ac.ru) повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Копаев Ю.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *О Н.Е. Алексеевском.*
2. **Брандт Н.Б.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва). *Мой учитель Николай Евгеньевич Алексеевский.*
3. **Песчанский В.Г.** (Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина). *Гальваномагнитные явления в слоистых проводниках.*
4. **Краснопёров Е.П.** (Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва). *У истоков технической сверхпроводимости в СССР.*
5. **Нижанковский В.И.** (Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва), **Цебро В.И.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *История создания и развития Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур.*

Статьи, написанные на основе докладов 2–5, публикуются ниже.

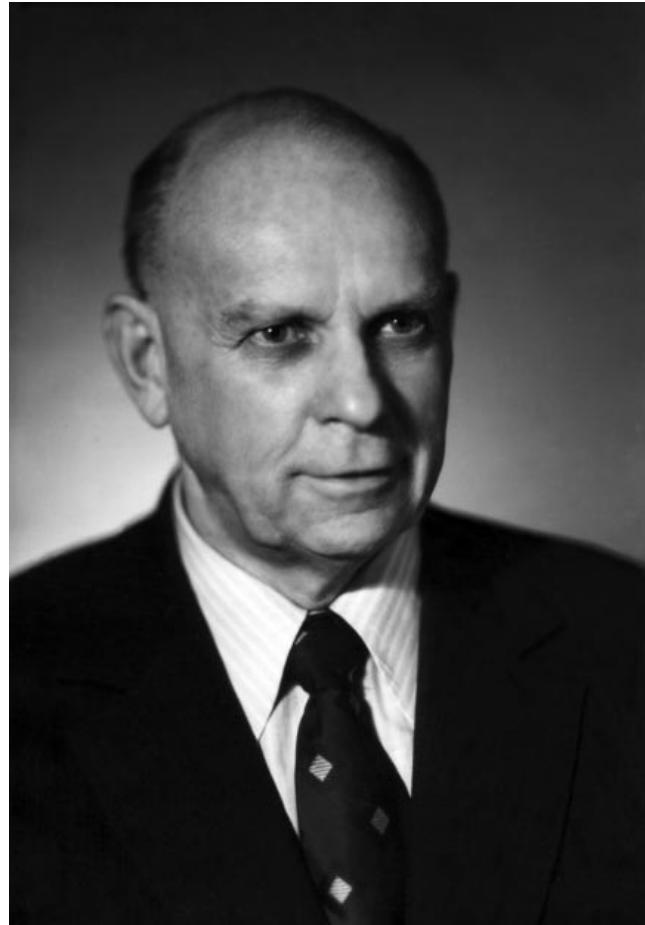
PACS numbers: 01.60.+q, 01.65.+g, 74.25.-q  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302h.0207

**Лучшие годы моей жизни**

Н.Б. Брандт

В 1946 г. я демобилизовался. Начав войну под Москвой, закончил её в г. Байтенау в Восточной Германии. На физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова был принят без экзаменов как демобилизованный и как окончивший среднюю школу с отличием. Уже не помню, кто посоветовал мне в начале 3-го курса съездить на семинар в Институт физических проблем АН СССР (ИФП). Посещение института произвело на меня неизгладимое

Н.Б. Брандт. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ  
E-mail: brandt@mig.phys.msu.ru



Николай Евгеньевич Алексеевский  
(23.05.1912–23.09.1993)

впечатление. Трудно передать словами то чувство, которое я испытал. Это была какая-то смесь благоговения и очарованности. Вероятно, такое же чувство испытывает верующий во время посещения Храма. Сам стиль и архитектура института, обстановка, массивные старинные напольные часы в приёмной, ковровые дорожки на лестнице и в коридорах, размеренный и неторопливый стиль жизни, отношения между сотрудниками создавали какую-то особую, совершенно необычную для меня атмосферу, которая дополнялась атмосферой таинственности и значимости того, что делалось в лабораториях института. Тогда же я сразу понял, что это единственное место, где мне хотелось бы учиться и работать. Так я распределился на кафедру физики низких температур, которой в то время

заведовал А.И. Шальников. Нас было четверо: я, Ефим Ицкевич, Вера Бравина и Валя Балашова.

С Николаем Евгеньевичем Алексеевским я впервые познакомился в спецпрактикуме по физике низких температур, несколько задач которого располагалось в большом зале института на первом этаже, где находилась знаменитая установка П.Л. Капицы для получения сверхсильных импульсных магнитных полей. Тогда я не знал, что вся моя дальнейшая научная судьба будет связана с этим человеком. Распределил меня в лабораторию Николая Евгеньевича несколько позднее А.И. Шальников. Это было в конце 6-го семестра, незадолго до начала летних каникул. Николай Евгеньевич заявил, что сейчас в лаборатории мне делать нечего, и дал мне книгу В.Л. Гинзбурга *Сверхпроводимость*, чтобы я прочитал её летом. Это была книжка, подаренная Н.Е. Алексеевскому автором с дарственной подписью "Дорогому Коле от автора. В. Гинзбург". Надо сказать, что, когда я показывал книгу однокурсникам, эта надпись производила на всех исключительное впечатление, все думали, что выдающийся учёный подарил книжку мне, студенту 3-го курса. Летом я с товарищами уехал отдыхать в Молдавию на Днестр в местечко Яруга, где мы подрабатывали фотографированием местных жителей, ловили рыбу, загорали, купались, немного путешествовали. Тем не менее в свободное от развлечений время я внимательно прочитал *Сверхпроводимость*, чем поразил Николая Евгеньевича по окончании каникул. Много лет спустя Николай Евгеньевич неоднократно вспоминал, что я был его единственным студентом, который потратил летние каникулы на изучение сверхпроводимости.

С сентября 1948 г. я начал работать в лаборатории Алексеевского. Лаборатория состояла из двух частей. Одна часть, в которой Николай Евгеньевич занимался сверхпроводимостью, располагалась на первом этаже и выходила в зал "сильных магнитных полей". Это была небольшая, 18–20 квадратных метров, комната с одним окном, в её середине находился швейцарский электромагнит со сменными полюсными наконечниками и регулируемым зазором, в котором можно было получать магнитные поля до 20–25 кЭ. В то время это был шедевр лабораторного оборудования.

Вторая часть лаборатории находилась в подвальном этаже. Там Николай Евгеньевич занимался разработкой масс-спектрометра оригинальной конструкции. Для повышения чувствительности была использована интересная идея: заряженные частицы двигались в неоднородном магнитном поле, так что величина отклонения частиц определялась не только их массой, но и напряжённостью магнитного поля, которая для траекторий более тяжёлых и более лёгких частиц была различна, что дополнительно увеличивало разрешающую способность прибора. Эти работы были закрытыми, подвал дополнительно охранялся, и проникнуть туда для меня было невозможно. Связь между "верхом" и "низом" осуществлялась только по телефону, причём, когда бы я ни звонил вниз, в любое время дня и ночи в телефонной трубке всегда слышался звук работающего форвакуумного насоса.

Николай Евгеньевич выделил мне рабочее место слева от входной двери. В лаборатории было всего три стола. Один Николая Евгеньевича, второй — его лаборанта, третий, стоявший слева у стены, достался мне.

Надо отметить, что условия работы в ИФП были просто замечательные, хотя и отличались определённым своеобразием. Во-первых, было принято, что каждый практически всё делает для своей работы сам: мелкие стеклодувные и механические, радиотехнические и мон-

тажные работы, ремонт и наладку приборов и т.д. Конечно, некоторые крупные работы, как, например, изготовление сосудов Дьюара, других сложных изделий из стекла, а также изделий, требующих прецизионной механической обработки, выполнялись в стеклодувной и механической мастерских института. Во-вторых, был открыт доступ всех сотрудников и студентов, выполняющих дипломные работы, на склад, куда можно было просто зайти и взять любые нужные для работы материалы, радиодетали и т.п.

В первый день, когда я пришёл в лабораторию, Н.Е. мне сказал: "Вы пока привыкайте, а когда перестанете тут всё бить, я скажу вам, что делать". И приставил меня к своему лаборанту Васе Зерцалову для выполнения подсобных работ. По своей наивности я воспринял слова Николая Евгеньевича как некоторую индульгенцию на возможный материальный ущерб, который я нанесу лаборатории в процессе акклиматизации. Поэтому, когда через два-три дня я разбил дьюар, я воспринял это совершенно спокойно и ничуть не огорчился. Даже испытал некоторое чувство удовлетворения от того, что сбылось предвидение моего научного руководителя. На следующий день Н.Е. пробурчал: "Дайте дьюар!" Я спокойно сообщил, что его разбил. И что тут началось! Н.Е. кричал минут десять, как минимум. Это произвело на меня такое сильное впечатление, что больше я не разбил в лаборатории ни одного дьюара.

Работать с Алексеевским было необыкновенно интересно. Время, проведённое в его лаборатории в ИФП, было, несомненно, самым счастливым временем в моей жизни. Сказать, что Николай Евгеньевич любил науку, — это ничего не сказать. Для Алексеевского наука была главной целью жизни. Она была священна. Это была религия, которой он поклонялся. Это было нечто, важнее чего ничего не существовало. Все приоритеты отдавались только науке. Малейшая измена науке не прощалась. Это была вещь, которую нельзя было ни с чем делить. Не дай Бог в рабочее время заняться чем-то другим, сделать что-либо для себя лично или для дома. Это считалось святотатством, преступлением.

Интересно, что вне лаборатории Николай Евгеньевич был очень остроумным, весёлым и интересным собеседником, свободно ориентировался в современной литературе и поэзии, которую особенно любил. Но как только он переступал порог лаборатории, то становился другим человеком. Всё, что было вне её, переставало существовать. От Н.Е. исходила какая-то внутренняя напряжённость и сосредоточенность, он был полон новых планов и идей. Им владело страстное желание осуществить их как можно быстрее, любой ценой. Мне приходилось встречать много талантливых физиков, для которых тщательная отработка методики и экспериментальной установки составляли не менее, а может быть, и более важную часть их исследовательской деятельности. При этом изящество найденных методических и конструктивных решений доставляли им истинное эстетическое наслаждение. Алексеевский не относился к их числу. Он был другим. Его неукротимая энергия, темперамент, необычайная активность не могли мириться с медленным эволюционным путём развития научных исследований. Он работал ради результата. Ему нужен был результат. Результат любой ценой. Если во время эксперимента треснула вакуумная система — не останавливая работы, попытаться ликвидировать течь, если кончился гелий — долить, сломался прибор — заменить другим, но во что бы то ни стало довести эксперимент до конца. Каждый рабочий день значил для него слишком много, чтобы его можно было потерять.

Но это не означало, что Н.Е. нужен был любой результат. Ему нужен был только правильный, абсолютно надёжный и воспроизводимый результат. Вот на воспроизведение экспериментальных данных, варьирование условий эксперимента, проверку и перепроверку Алексеевский времени никогда не жалел. Он был нетерпим ко всякого рода халтуре, небрежности при измерениях и анализе полученных данных, любой недобросовестности. Он органически не принимал необоснованного проજектёрства, любой профанации в науке, скороспелых и недостаточно аргументированных выводов. Здесь он был беспощаден, особенно по отношению к своим ученикам. Одно время меня очень увлекала идея о возможности существования сверхпроводимости в неравновесных условиях, когда, казалось бы, снимается ограничение на величину электрон-фононного взаимодействия, связанного с устойчивостью кристаллической решётки. Надо признать, что эта идея сразу же была отвергнута В.Л. Гинзбургом. Но это меня не убедило, и я рассказал о ней Николаю Евгеньевичу. Через некоторое время, когда я придумал модификацию первоначальных соображений, Н.Е., с которым я встретился на одном из низкотемпературных совещаний, спросил: "Ну что, Коля, продолжаете гадить в науку?" И надо признать, хотя меня тогда обидело это высказывание, Н.Е. оказался прав. Но это я понял значительно позднее. Я думаю, что определённая нарочитая и характерная для Николая Евгеньевича грубоść высказываний была чисто внешней манерой, может быть, даже своеобразной маскировкой, скрывающей добрую и легкоранимую душу.

У Николая Евгеньевича была одна замечательная черта характера — он никогда не мог вечером уйти из лаборатории, если в ней оставался работать хотя бы один сотрудник. Надо сказать, что в то послевоенное время все работали в институте очень много, так что рабочий день составлял далеко не восемь часов, а намного больше. Главное внимание Н.Е. уделял тогда своей работе в "нижней" лаборатории и наверху появлялся обычно вечером, часов в 9–10, и с насупленным, недовольным видом спрашивал: "Куда подевался этот сукин сын Борис?" Боря Самойлов был в то время аспирантом у Алексеевского, хотя выполнял работу в лаборатории П.Г. Стрелкова. Я отвечал: "Уже поздно, Николай Евгеньевич, ведь уже 10 часов, а ему далеко ехать до дома. Если Вам нужно чем-нибудь помочь, то я с удовольствием помогу".

Я очень любил работать по вечерам. Днём было суетно. Лаборатория маленькая. Толпится народ. Заходят, уходят. Мешают. А вечером, когда все расходились по домам, было очень спокойно и радостно работать. В то время я не представлял себе, как это можно устать на работе. Интересная работа — это радость и счастье. А так как кроме неё было много всяких интересных дел, я очень дорожил каждой минутой времени, проведённого в лаборатории Николая Евгеньевича. Так вот, за всё время нашей совместной работы (в ИФП это почти 2,5 года) Николай Евгеньевич никогда не уходил из лаборатории раньше меня. Бывали дни, когда он, наверное, очень уставал и часов в 11 вечера начинал смотреть на часы. Я всегда предлагал доделать работу самому (т.е. подготовить установку к завтрашнему дню, смонтировать образец, собрать криостат, подключить, наладить, проверить радиотехнику и т.д.), но не было случая, чтобы он согласился уйти раньше. Тогда он вставал и, пробормотав: "Пойду принесу чего-нибудь поесть", — уходил из лаборатории и минут через 15 возвращался с бутербродами, и, перекусив, мы продолжали работу. Иногда Николай Евгеньевич приглашал зайти к нему поужинать. Жил он рядом с

институтом в доме для сотрудников с двухэтажными квартирами. Квартира Н.Е. располагалась на первом этаже, к которой много позднее, когда он женился, присоединили ещё одну комнату от соседней квартиры. Н.Е. жил тогда вместе с мамой, очень милой и заботливой женщиной. Уходили вместе. Позднее в лаборатории появились новые студенты — Таня Костина и Володя Липаев. Но порядок оставался неизменным. Все работали до поздней ночи. Это прибавило хлопот Николаю Евгеньевичу. В лаборатории появилась дама. Отпускать её одну ночью было как-то неудобно. А у Николая Евгеньевича был "Москвич" — маленькая машинка первой модели. Теперь Николаю Евгеньевичу приходилось всю компанию развозить ночью по домам. Я жил на Арбате, а Таня — дальше по Садовому кольцу, у американского посольства. Иногда приходилось развозить четырёх человека, а поместиться троим на заднем сиденье "Москвича" в нормальном положении было практически невозможно. Кому-то одному приходилось полулежать на коленях у сидящих, упираясь ногами и головой в стёкла задних дверей. Я как-то пошутил: как хорошо, что вышло постановление ЦК и Совмина о мерах по повышению качества продукции, — стёкла выдерживают огромную нагрузку. К моему удивлению, Николай Евгеньевич, который очень любил пошутить и ценил остроумие, никак на это не прореагировал. Лишь позднее я понял, что в то время постановления ЦК в шуточной форме упоминать было опасно, и мудрый Николай Евгеньевич дал понять, что на эту тему лучше не говорить. Другое дело — анекдоты на бытовые и супружеские темы. Николай Евгеньевич знал их огромное множество, причём — и это редко бывает — все они были остроумными и без всякой пошлости. У Николая Евгеньевича был хороший вкус и чувство меры.

В лаборатории было две установки для измерения магнитного момента сверхпроводников баллистическим методом: образец перемещался с помощью штока, верхний конец которого выходил через сальник в капке дьюара из одной катушки в другую, и регистрировалось смещение на шкале зайчика баллистического гальванометра. Когда измерялись сверхпроводящие сплавы, наблюдался так называемый тайм-эффект — величина "отброса" гальванометра постепенно уменьшалась с течением времени, и нужно было дождаться, пока установится равновесное значение. Это был длительный процесс: иногда, чтобы получить нужное значение отброса, требовалось около часа. И вот во время таких измерений я как-то обнаружил, что если резиновую трубку, через которую откачивался гелий из криостата, переместить в пространстве, то гальванометр давал отброс! Долгое время никто не мог понять, в чём дело. Потом я догадался, что резиновая трубка электризовалась и её перемещение создавало импульс электрического тока. Николай Евгеньевич назвал этот эффект "эффектом прямой кишкой" и долгое время шутил на эту тему, входя в лабораторию.

При всех достоинствах у Николая Евгеньевича был один недостаток — он не любил писать, даже научные статьи, не говоря уже о всяких отзывах на диссертации, экспертных заключениях и т.д. Поэтому он очень охотно поручал это делать мне, заявив: "Фирма наша, деньги — Ваши". А деньги были тогда, в голодное послевоенное время, для меня очень существенны. Когда Николаю Евгеньевичу приносили на отзыв диссертацию, он обычно передавал её мне с напутствием: "Мура", "Так себе" или: "Посмотрите сами". Этим я и руководствовался. А соискателю он говорил: "По всем вопросам обращайтесь только к Николаю Борисовичу". При этом соискатели

меня и в глаза не видели и понятия не имели, кто такой Николай Борисович, но заведомо проникались уважением и испытывали трепет при упоминании моего имени. Я сначала не понимал, откуда такое ко мне отношение, до тех пор пока не произошёл следующий случай. Обычно соискатели приходили за отзывами или для выяснения непонятных вопросов вечером, после окончания официального рабочего дня. Из вестибюля института они должны были позвонить по телефону в лабораторию Н.Е. Алексеевского, а если там в данный момент никого не было, — в лабораторию П.Г. Стрелкова, где работал аспирант Николая Евгеньевича Борис Самойлов. Как-то вечером мне передали, что меня ждут в вестибюле. Я вышел и застал там крайне смущённого соискателя, который пробормотал извинения, что оторвал меня от ужина, и я никак не мог понять, о чём идёт речь. Оказалось, что он позвонил в лабораторию П.Г. Стрелкова, попросил меня, а Борис, человек очень остроумный и большой любитель всяких розыгрышей и шуток, ответил: "Они сейчас чай кушают. Когда откушают — изволят выйти".

Одной из замечательных черт характера Николая Евгеньевича была простота и естественность общения со всеми сотрудниками, аспирантами и студентами. Он никогда не подчёркивал своего служебного положения, всегда разговаривал на равных, даже со студентами. Это касалось и научных, и общежитейских вопросов. С Николаем Евгеньевичем говорить о науке было необычайно интересно. Во-первых, он всегда искренне радовался удачному эксперименту, новому результату. Во-вторых, у Николая Евгеньевича всегда появлялись новые идеи, и мы вместе обсуждали, как их можно наиболее быстро и просто реализовать. В-третьих, у него была исключительная интуиция, какое-то внутреннее чувство, позволяющее оценить надёжность полученного результата, степень его достоверности.

Первым моим заданием было разработать и создать систему для измерения магнитной восприимчивости радиотехническим методом. Образец помещался в измерительную катушку, вторая, наружная, катушка создавала переменное магнитное поле с небольшой амплитудой. При изменении магнитной восприимчивости образца изменялась величина электродвижущей силы, генерируемой переменным магнитным полем в измерительной катушке. При начальных условиях этот сигнал компенсировался, и регистрировалось его появление, когда магнитная восприимчивость образца изменялась. Этот метод можно было использовать для регистрации перехода образца в сверхпроводящее состояние, причём образец и измерительные катушки были пространственно разъединены, что позволяло, например, измерять сверхпроводящий переход у образца, помещённого в камеру для создания высокого давления. Нужно было смонтировать узкополосный низкочастотный генератор, узкополосный усилитель, работающий точно на такой же частоте, и систему компенсации исходного сигнала. Всё это должно было быть экранировано от внешних электромагнитных помех. Приблизительно через два месяца я такую установку смонтировал. Настал день испытания. Надо сказать, что до этого времени сверхпроводящий переход измерялся только баллистическим методом. Пришёл Николай Евгеньевич. Я скомпенсировал исходный сигнал. Включили откачу паров гелия из дьюара, температура начала понижаться и одновременно начала перемещаться стрелка милливольтметра. Я был страшно разочарован. В дьюаре находился образец, у которого температура сверхпроводящего перехода равняется 3,73 К, и изменение сигнала должно было происходить только при достижении этой

температуры. Николай Евгеньевич молча отсоединил свою измерительную систему, подключил измерительную катушку прямо к баллистическому гальванометру и снова включил откачу. При достижении температуры 3,73 К зайчик на шкале гальванометра резко отклонился в сторону. Николай Евгеньевич сказал: "Вот это — наука". И ушёл из лаборатории. Для Алексеевского важнейшим достоинством той или иной методики была её надёжность, максимальная достоверность получаемого результата. Я думаю, даже больше: возможность экспериментатора ощущать эту достоверность, получать не косвенную, а прямую информацию об измеряемом свойстве исследуемого вещества.

Мне потребовалось ещё довольно много времени, чтобы довести переменноточную методику до такого состояния. Однако, когда я снова попросил Николая Евгеньевича провести испытания и когда он убедился, что методика позволяет не просто регистрировать возникновение сверхпроводящей фазы, но и надёжно регистрировать изменение объёма этой фазы при снижении температуры, т.е. степень однородности образца, и результаты измерения прекрасно воспроизводятся при повторных экспериментах, методика была одобрена и прочно вошла в арсенал экспериментальных методов лаборатории, а затем получила более широкое распространение. Я был удостоен скромной похвалы, но не более. Надо признать, что Николай Евгеньевич всегда опасался перехваливать сотрудников, по-видимому, считая, что это может их испортить. Но он всегда искренне радовался всякому новому результату, и поэтому работать с ним было особенно интересно.

Вспоминая сейчас времена нашей совместной работы, я неожиданно для себя понял, что Николай Евгеньевич никогда не относился ко мне как к "студенту", а позднее как к "аспиранту". Для него я был коллега. Дискуссии, обсуждения, споры всегда велись "на равных". Только обоснованные аргументы принимались во внимание. Никакого насилия. Лишь иногда давление в самой мягкой форме: "Я бы на вашем месте сделал то-то и то-то..." Или: "Если вы займёtesесь тем-то, то за пять лет сделаете докторскую диссертацию". И полное отсутствие так называемой мелочной опеки. Даже, я думаю, чересчур полное. Всё-таки надо что-то не советовать делать или, по крайней мере, объяснять, почему нельзя так делать. Или даже, видя явную бессмысленность какого-либо решения, просто не допустить, чтобы оно реализовалось на практике. Тут, по-видимому, проявлялась чрезмерная деликатность Николая Евгеньевича, уважение к мнению сотрудника, вера в его способности.

В лаборатории Николая Евгеньевича было принято отмечать удачу. Чаще всего для этой цели использовался разбавленный спирт. Событие отмечалось в узком кругу сотрудников, прямо в лаборатории (естественно, вечером) при закрытых дверях, когда шеф отсутствовал, что специально проверялось. Но бывало и иначе. В послевоенные годы на улице Горького в винном магазине (если идти от Манежной площади вверх, то на правой стороне) иногда продавались коллекционные вина 50-летней выдержки, вывезенные из Германии по reparations. Длинные бутылки из тёплого стекла были герметически закупорены длинными пробками, и горлышки бутылок залиты воском. Белые мозельские и красные вина. Я как-то купил по случаю две бутылки разных сортов и спрятал в лаборатории. Как-то мы с Николаем Евгеньевичем обсуждали новый результат. В лабораторию вошёл Пётр Георгиевич Стрелков и спросил: "Есть что-нибудь интересное?" Николай Евгеньевич тут же ответил: "Навозну кучу разрывая, Николай Борисович нашёл жемчужное зерно".

Дело в том, что я тогда исследовал гальваниомагнитные свойства сплавов, а это был очень "грязный" объект для исследования — немонокристалличность, примеси, отклонения от стехиометрии и т.п. А здесь мне удалось вырастить хороший монокристалл и впервые на сплавах наблюдать квантовые осцилляции магнетосопротивления — эффект Шубникова — де Гааза. После этого я предложил опробовать коллекционное мозельское, и мы втроём пошли к Николаю Евгеньевичу домой. Как я уже говорил, у Николая Евгеньевича была трёхкомнатная квартира: две смежные комнаты и спальня. Большая комната служила гостиной, а маленькая — кабинетом. Вот в этой маленькой комнате мы и откупорили бутылку. Вкус вина у меня вызвал разочарование (чувствовался явный привкус сероводорода). Николай Евгеньевич ничего не сказал, а Пётр Георгиевич заметил: "Мягкое, своеобразный букет". Я думаю, что все мы в то время не были знатоками тонких вин, нас объединяло стремление познать неизведанное. Позднее мы дегустировали и другие сорта, всегда в том же самом кабинете и с участием Петра Георгиевича.

Поскольку мы были студентами кафедры физики низких температур, специальные лекции читались нам сотрудниками ИФП, которые работали на кафедре по совместительству. Лекции по сверхпроводимости читал Николай Евгеньевич, по теории сверхпроводимости — А.А. Абрикосов. Курс термодинамики — И.М. Халатников. Замечательный семинар по экспериментальной физике вёл заведующий кафедрой А.И. Шальников. Николай Евгеньевич очень серьёзно относился к своим лекциям. На каждую он обычно приносил толстую стопку различных журналов с большим числом закладок. Я знаю по собственному опыту, что когда готовишься к лекции, всегда кажется, что материала не хватит на два часа и поэтому набираешь такой объём, из которого успеваешь изложить в лучшем случае половину. О серьёзности, с которой Николай Евгеньевич готовился к лекциям, можно судить по тому, что из принесённой им стопки научных журналов и книг при чтении лекции использовалась лишь небольшая часть, никогда не превышающая одной трети. Для меня оставалось загадкой, что содержалось в неиспользованной литературе: излагалось ли это на следующих лекциях или оставалось для нас безвозвратно потерянным. Загадка так и осталась неразрешённой. Николай Евгеньевич, как человек, очень глубоко разбирающийся в материале, боясь неточностей, часто делал всякого рода оговорки. При этом, чтобы не терять времени, он переходил на скороговорку, напоминающую бормотание, так что понять все тонкости было практически невозможно. Когда же мы переспрашивали или задавали вопросы, он начинал нервничать и отвечал очень раздражённо. На лекциях Николай Евгеньевич был очень сосредоточен. Столь же серьёзно он относился к выступлениям на конференциях и совещаниях. Готовился всегда очень тщательно, а число слайдов всегда намного превышало то количество, которое демонстрировалось во время выступления. Обычно к подготовке иллюстративного материала привлекались все сотрудники лаборатории. Каждому давалось задание что-то начертить, перефотографировать, сделать слайды и рисунки для диапроектора, причём весь процесс держался под постоянным контролем. И во время конференции, после заседаний, Николай Евгеньевич просил кого-либо из сотрудников зайти к нему в номер, чтобы сделать что-то дополнительное. Доклад для него доминировал над всем остальным, он постоянно думал на эту тему, совершенствовал содержание, что-то менял, вносил дополнения.

Примечательный штрих: если Н.Е. кого-нибудь и хвалил, то почти всегда в ироничной форме, например: "Ну что? Воткнули ещё одно шило в зад (имярек)?" Имелся в виду кто-либо из занимающихся аналогичными вопросами. А за хорошо сделанный доклад на конференции высшей формой одобрения было: "Послушайте, Вы хорошо рассказали". Но это бывало очень редко и говорилось обычно в соответствующих условиях, не просто по поводу доклада, а при обсуждении связанных с той или иной проблемой вопросов. У меня с Николаем Евгеньевичем установились очень хорошие отношения и во время моей дипломной практики в ИФП, и во время аспирантуры, когда мне по независящим от меня обстоятельствам пришлось работать не в ИФП, а в лаборатории П.Г. Стрелкова в Институте метрологии на ул. Щусева, неподалёку от особняка, в котором жил Берия. П.Г. Стрелков работал в Институте метрологии по совместительству. Его лаборатория, которая занималась разработкой эталонных термометров для установления термодинамической температурной шкалы, помещалась в изолированном приделе к зданию и состояла из небольшого "предбанника", в котором находился охижитель водорода, большой комнаты на первом этаже и подвала. Старшим в лаборатории был Андрей Станиславович Боровик-Романов. Он и Маргарита Петровна Орлова занимали верхнюю комнату. Я, Дима Астров, Наташа Крейнес и Ефим Ицкевич работали в подвале. У меня на всю жизнь сохранились самые тёплые воспоминания об этой лаборатории, которая принютила меня в лихую годину, и чувство глубокой признательности всем сотрудникам, которые в ней работали. Замечательная атмосфера взаимопонимания, взаимопомощи и теплоты помогала всем нам, несмотря на все трудности, успешно работать. Николай Евгеньевич вместе с П.Г. Стрелковым часто приезжал к нам в подвал, и мы вместе обсуждали полученные результаты. Его моральная помощь была очень важна.

Надо сказать, что Николай Евгеньевич очень много сделал для меня в то время. На старших курсах и при обучении в аспирантуре мне приходилось подрабатывать: на одну стипендию прожить вместе с мамой, которая не работала по состоянию здоровья, было нелегко. Поэтому я обычно сдавал все экзамены досрочно и летом на три месяца устраивался в геофизические экспедиции. Вскоре меня заметила дирекция Института физики Земли и стала приглашать в экспедиции на руководящие должности. Одна из них — исполняющий обязанности заведующего геофизической станцией Крымского полуострова. Я был зачислен временно с целью сохранить эту должность для замещения её в дальнейшем постоянным сотрудником. Станцию планировалось создать в Ялте в роскошном особняке, в котором в то время помещалась Ялтинская сейсмическая станция. До революции это здание принадлежало одной из фрейлин императрицы. Оно представляло собой двухэтажную виллу с огромными крестообразно расположенными открытыми балконами на первом и втором этажах. На один из балконов второго этажа вела мраморная лестница, увитая сверху и с боков виноградной лозой. В августе сверху свешивались крупные кисти ягод. Виллу окружал сад. Для организации работ мне была выделена машина, а из Москвы прибыло много специальных приборов и оборудования.

Я решил использовать сложившуюся ситуацию и предложил Николаю Евгеньевичу приехать во время летнего отпуска в Ялту и принять участие в поездках по Крыму. Он согласился, и, после того как его мама дала мне кучу указаний, от чего и как я должен уберегать Николая Евгеньевича, я выехал в Ялту поездом и через несколько

дней должен был встретить учителя, который собирался прилететь самолётом. Я очень отчётливо помню, как Николай Евгеньевич в сером костюме и галстуке вышел из автобуса в Ялте. Вид у него был утомлённый. Первым делом он сказал: "Ну, теперь это не нужно", — и снял галстук. Геофизическая станция располагалась не так далеко от автобусной остановки, но чтобы сразу же продемонстрировать наши возможности, встречать Н.Е. я приехал на грузовике. Этот месяц, проведённый вместе в Крыму, ярко запечатлелся в моей памяти. Мы много ездили по самым заповедным местам Крыма, были в пещерном городе в Тепе-Кермене, в малодоступных (в то время) местах на побережье и в горах, ходили к водопадам и горным озёрам, загорали на пляже и купались в море. В один из таких дней, когда мы сидели на пляже, к нам подошёл бродячий художник и предложил нарисовать кого-либо из нас. Николай Евгеньевич сразу же указал на меня: "Вот его нарисуйте". Посмотрев на готовый портрет, Николай Евгеньевич, внимательно следивший за всей процедурой, сказал: "Карандашный вариант был много лучше. Не надо было раскрашивать". Этот рисунок хранится у меня до сих пор.

Николай Евгеньевич был спортивным человеком. Он очень любил плавать. Один раз, где-то на побережье, мы устроили остановку на обед. Расположились в уютной бухточке. Слева в море выступала скала. Н.Е. предложил её обогнать и посмотреть, что там за скалой. Поплыли вместе. Море было не очень спокойным, и волны мешали плыть быстро. Николай Евгеньевич плавал стилем, напоминающим кроль. Голова находилась большую часть времени в воде, и он не мог следить за окружающей обстановкой. Надо признать, плыл он здорово. Я старался не отстать, и это стоило большого труда. Когда мы оказались напротив скалы, я почувствовал, что больше с такой скоростью плыть не могу, и готов был смириться с поражением. Но в этот момент Николай Евгеньевич вдруг остановился, обернулся назад и увидел меня. Он был очень удивлён: "Слушайте, Вы здорово плаваете. Я думал, что Вы и половины не одолели". Дальше мы плыли медленно. И уже позднее, в Москве, когда речь заходила о том, кто как плавает, Николай Евгеньевич всегда говорил: "Вот Коля у нас здорово это делает". И ещё один факт: после осмотра пещерного города, который находился у вершины горы, Н.Е. спускался вниз бегом, а до машины было 3–4 километра. И ёщё. Несколько раз мы ходили из Ялты по ущельям в горы. Как-то зашли довольно далеко. Ущелье сузилось, и мы упёрлись в почти вертикальную каменную стену, высотой метров 6–7. И тут, к моему удивлению, Николай Евгеньевич, никого не предупредив, начал подниматься по стене вверх. Я очень испугался, что он сорвётся. Но, к моему счастью, поднявшись метра на четыре, профессор благополучно спустился вниз со словами: "Напрасно Вы не хотите, тут подняться пара пустяков".

Николай Евгеньевич очень быстро входил в компанию и держался очень просто, на равных. В одну из поездок мы остановились на ночёвку около небольшого посёлка. Легли без ужина. Можно было переночевать в доме, но Н.Е. предпочёл автомашину. Я из солидарности решил сделать то же самое. Между тем никаких спальных мешков у нас не было. Было по одеялу на человека. И всё. Я в армии привык спать в любых условиях и воспринимал отсутствие комфорта как нечто вполне естественное. Но мой профессор привык жить в домашних условиях, однако — ни одного слова неудовольствия!

Николай Евгеньевич, несмотря на постоянную сосредоточенность, погруженность в науку, умел расслаб-

ляться, особенно когда был повод. На одной из конференций по физике низких температур, которая проходила в Харькове, я, Таня Костина, Слава Пономарёв, Лена Свистова, Юра Пospelов, Майя Кострюкова решили отметить за ужином в ресторане удачный доклад. Все мы очень любили Николая Евгеньевича и, когда он тоже зашёл поужинать, пригласили его в нашу компанию. Настроение у всех было очень хорошее. Заказали две бутылки горилки с перцем. Как-то очень быстро их выпили. Заказали ещё одну, и она тоже быстро опустела. Возникла дискуссия: заказывать ещё или нет. Решили провести тайное голосование. Раздали по кусочку бумаги со словами "да", "нет". Собрали бюллетени. С отметкой "да" оказалось 6, "нет" — 0. Тут же заказали четвёртую бутылку и опять очень быстро выпили. Было очень весело. Николай Евгеньевич рассказывал смешные случаи, анекдоты. Решили провести повторное голосование. Результат: за — 6, нет — 0. Потом проводилось ещё одно голосование. Итог уже не был единогласным: за — 5, нет — 1. Но я точно знаю, кто голосовал против, и это был не Николай Евгеньевич. После ресторана все вместе долго гуляли по ночному Харькову. На детской площадке катались на карусели, с горок, пели песни. Такого Н.Е. я больше ни разу не видел.

Николай Евгеньевич был человек прямой, абсолютно неспособный на всякого рода интриганство, нечестность. Он всегда высказывал своё мнение открыто, хотя иногда для этого требовалось определённое мужество. В редких случаях, если он не был согласен с собеседником, предположил промолчать. Но никогда, насколько я знаю, не покривил душой. Когда в Донецке создавался под эгидой местного совнархоза Донецкий научный центр, Александр Александрович Галкин, назначенный директором-организатором, пригласил нас с Николаем Евгеньевичем приехать в Донецк. Он решил проконсультироваться с нами по научным вопросам. В самолёте Н.Е. сказал мне: "Что-то Саша хитрит. Смотрите, не попадитесь". Когда мы прилетели, у трапа самолёта встречала нас целая делегация во главе с секретарём обкома, с чёрной "Волгой". Николай Евгеньевич почувствовал неладное и сразу наступил. Привезли нас в гостиницу. Поселили каждого в номере люкс, в одном из которых уже был накрыт стол со множеством закусок и напитков. Когда мы на короткое время перед ужином остались одни с А.А., Николай Евгеньевич в очень резкой форме отчитал Сашу, что "так не делают", "что он тут затеял", "я не мальчик, чтобы со мной так поступать" и т.п. Оказалось, что нам хотят предложить переехать на работу в Донецкий научный центр и что, как только мы дадим согласие, нас изберут академиками АН Украины, для нас готовы квартиры и участки для дач на берегу Азовского моря, всё это будет нам официально продемонстрировано. Мы не успели ответить — явилась вся высокопоставленная команда, и мы сели ужинать. Саша просил пока ничего не решать. Надо отметить, что такая встреча и такой размах были в духе А.А., который был, наверное, последним романтиком в физике. Потом мы осмотрели территорию, выделенную под научный центр, план застройки, квартиры (я думаю, они были предназначены не для нас, но иллюстрировали тип предлагаемого жилища). Обе на верхнем этаже дома, и когда Николай Евгеньевич спросил: "Почему на верхнем?" — Саша ответил, мол, для того, чтобы легче было сделать камини (знал, чем соблазнить). Потом ездили на берег Азовского моря. Поселили нас в обкомовских дачах. На следующее утро пригласили на рыбную ловлю — промышлять стерлядь. Нас посадили на рыбакский баркас. Было ветрено, наверное балла три. Но рулевой старался

всё время подставлять баркас боком к волне, видимо, для того, чтобы мы почувствовали, что такое моряцкая жизнь. Стерлядь мы, конечно, не ловили, сети бросали с других баркасов, а мы всё время крутились около, под углом  $\pi/2$  к ветру. Меня быстро укачивает, и эта игра вскоре страшно надоела. Но Николай Евгеньевич, хотя и не выражал никакого восторга, мужественно испил чашу до дна. Когда причалили к берегу, нам сообщили, что поймали 26 килограммов стерляди, и директор рыболовецкого совхоза пригласил нас всех к себе домой на завтрак. Когда поднимались на большую веранду, где был накрыт стол и стояло несколько глиняных мисок с только что изготовленной чёрной икрой, кто-то из начальства вполголоса спросил сопровождавшего нас инструктора: "Ящики привезли?" Как вскоре выяснилось, подразумевались ящики с водкой. За столом нас посадили раздельно: меня рядом с директором рыбхоза, Николая Евгеньевича — с кем-то из более высокого начальства. Водку пили из гранёных стаканов. Первый тост был за гостей из Москвы. Мы отпили по трети стакана, закусили ложечкой чёрной икры. Тут мой сосед громовым голосом спросил: "Ты что же, Борисыч, с рабочим классом пить брезгуешь? И кто так закусывает?" Взял миску чёрной икры и половину (не менее 0,5 кг) переложил в мою тарелку. Такая же участь постигла и Николая Евгеньевича. Пришлось выпить до конца и закусить несколькими ложками икры. Затем была уха из стерляди, и, не будь такой закуски, мы, наверное, вскоре бы умерли от такого количества выпитой водки. Уже в конце трапезы А.А. спросил Николая Евгеньевича, что мы решили. Ответ прозвучал очень резко: "Ну зачем, Саша, ты всё это делаешь? Ведь ты же прекрасно знаешь, что мы с Колей не уедем из Москвы". У меня бы не хватило мужества так ответить. Спасибо Николаю Евгеньевичу. Снял тяжесть с души. Неудобно пользоваться гостеприимством, когда нечем отблагодарить...

То, чем жил Николай Евгеньевич, перешло к его ученикам. И когда возникают сомнения или просто усталость, память о нём — Учёном, Учителе, Человеке, Неутомимом Труженике — помогает жить и работать.

PACS numbers: 01.65.+g, 71.18.+y, 72.20.My  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302i.0213

## Гальваномагнитные явления в слоистых проводниках

В.Г. Песчанский

Мне приятно вспомнить годы активного сотрудничества с Николаем Евгеньевичем Алексеевским и сотрудниками его лаборатории, когда был создан надёжный спектроскопический метод изучения топологической структуры электронного энергетического спектра металлов с помощью измерения гальваномагнитных характеристик в сильном магнитном поле.

Теоретический аспект этой проблемы был разработан в Харькове. Анализ гальваномагнитных явлений в металлах с открытой поверхностью Ферми (ПФ) без при-

**В.Г. Песчанский.** Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина. E-mail: vpeschansky@ilt.kharkov.ua

влечения модельных представлений об электронном энергетическом спектре показал, что наличие плоских сечений изоэнергетической поверхности  $\varepsilon(\mathbf{p}) = \text{const}$ , проходящих через много ячеек импульсного пространства, существенным образом влияет на зависимость сопротивления от величины сильного магнитного поля.

В отличие от дрейфа свободных электронов, дрейф носителей заряда с открытой траекторией в импульсном пространстве отклонён от направления магнитного поля на угол, зависящий от проекции импульса электрона проводимости  $r_H = \mathbf{p}\mathbf{H}/H$  на направление магнитного поля. В результате, сопротивление весьма чувствительно к ориентации магнитного поля относительно кристаллографических осей, и при тех его ориентациях, при которых появляются либо исчезают открытые траектории в импульсном пространстве электронов с энергией  $\varepsilon(\mathbf{p})$ , равной энергии Ферми  $\varepsilon_F$ , в угловой зависимости магнетосопротивления возникают особенности [1].

Проведена классификация этих особенностей и, по сути, в работе [1] сформулирована обратная задача изучения топологии ПФ,  $\varepsilon(\mathbf{p}) = \varepsilon_F$  — основной характеристики электронного энергетического спектра вырожденных проводников — по измерению анизотропии магнетосопротивления в достаточно сильном магнитном поле, когда радиус кривизны траектории носителей заряда значительно меньше длины их свободного пробега. На примере открытой ПФ в виде гофрированного цилиндра показано, что даже в весьма сильном магнитном поле может оказаться невозможным полный оборот электрона проводимости по сильновытянутой замкнутой орбите без столкновений.

В результате, магнетосопротивление как функция угла между вектором магнитного поля и одной из кристаллографических осей имеет острый максимум в области углов  $\theta$ , близких к  $\pi/2$ , с шириной, обратно пропорциональной величине магнитного поля.

При  $\theta = \pi/2$  во всех возможных направлениях дрейфа электронов заполняет всю плоскость  $xy$  и сопротивление току вдоль оси  $z$  квадратично возрастает с увеличением сильного магнитного поля. При отклонении вектора магнитного поля от оси  $z$  на небольшой угол  $A$ , равный отношению периода движения электрона по замкнутой орбите  $T$  к времени его свободного пробега  $\tau$ , сопротивление практически не зависит от величины магнитного поля. Ввиду очень большой остроты максимума в сильном магнитном поле любое усреднение по углам в интервале, включающем в себя  $\theta = \pi/2$ , приводит к линейному возрастанию с увеличением поля сопротивления поликристаллического проводника с ПФ в виде гофрированного цилиндра (см. рисунок) и даже монокристаллического образца с небольшой мозаичностью. В результате была объяснена линейная зависимость сопротивления от магнитного поля большого числа металлов, обнаруженная Капицей [2].

В том же 1958 году Алексеевский и Гайдуков, исследуя магнетосопротивление монокристалла из достаточно чистого золота, показали, что усреднённое значение сопротивления по четырём различным ориентациям магнитного поля линейно возрастает с увеличением поля [3].

С тех пор началось моё сотрудничество с Николаем Евгеньевичем и сотрудниками его лаборатории. Я был посвящён в "кухню" экспериментальных исследований, поскольку занимался теоретической интерпретацией экс-

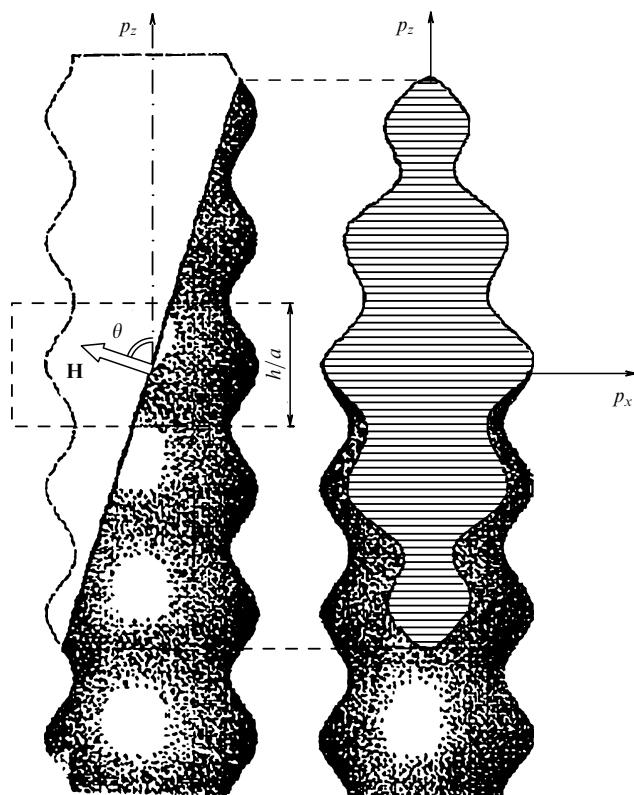


Рисунок. Поверхность Ферми в виде гофрированного цилиндра и траектории электронов проводимости в проекциях  $p_y - p_z$  и  $p_x - p_z$ .

периметральных результатов и мне приходилось примерно один раз в два месяца приезжать в Москву.

Различное возрастание сопротивления с увеличением магнитного поля при разных кристаллографических ориентациях вектора магнитного поля наблюдали ещё в 1930-х – начале 1940-х годов Юсти и Шеферс [4] в меди, Лазарев, Нахимович и Парфёнова [5] в цинке, Юсти [6] в золоте. При вращении магнитного поля в плоскости, ортогональной плотности тока  $j$ , в максимуме такой "розетки" сопротивление возрастало с увеличением магнитного поля значительно сильнее, чем в минимумах. Это обстоятельствоказалось загадочным, поскольку противоречило описанию электронного транспорта на основе представления энергетического спектра носителей заряда в металлах в виде квадратичной зависимости их энергии от импульса, а также предположения о том, что периодический потенциал ионов воздействует лишь на величину эффективной массы электронов проводимости  $m^*$ . В отсутствие магнитного поля такое представление об энергетическом спектре электронов проводимости не приводило к противоречию между экспериментом и теорией и являлось вполне приемлемым вплоть до 1950-х годов. В то же время в прекрасной книге по электронной теории металлов Арнольда Зоммерфельда и Ганса Бете [7] были приведены рассчитанные изоэнергетические поверхности для электронов в металлах с гранецентрированной кубической симметрией во всей зоне проводимости. Значительная часть таких поверхностей являлись открытыми, однако этому обстоятельству не было уделено должного внимания.

Алексеевский был блестящим экспериментатором, фанатически увлечённым физикой. Начало его творческого пути связано с лабораторией низких температур

Л.В. Шубникова в Украинском физико-техническом институте в Харькове, где он открыл около десяти новых сверхпроводящих сплавов и исследовал влияние магнитного поля тока на их сверхпроводящее состояние. Будучи руководителем лаборатории, Николай Евгеньевич любил сам заниматься технической подготовкой эксперимента и проводить измерения. Обычно в первой половине дня он носился по лаборатории в рабочем халате. Затем он исчезал, поскольку у него хватало энергии преподавать в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова и заведовать кафедрой общей физики в Московском физико-техническом институте. Н.Е. Алексеевский мог вновь появиться в лаборатории за полчаса до официального окончания рабочего времени и щедро раздавать объёмные задания сотрудникам. Он обладал поразительной работоспособностью и требовал того же от своих учеников, поэтому задержаться в лаборатории после окончания рабочего дня он считал вполне нормальным и даже необходимым. Однако относился он к своим сотрудникам с заботой и вниманием.

За сравнительно короткое время благодаря исследованиям анизотропии магнетосопротивления большого числа металлов в лаборатории Алексеевского и теоретическим работам [1, 8, 9] была определена топология ПФ золота [3, 10, 12], олова [9], меди и галлия [11], магния [13], свинца [14], серебра и цинка [15], таллия [16], рения [17], ванадия и вольфрама [18], палладия [19], осмия [20], индия [21], титана и хрома [22], ниобия [23], платины [24], бериллия [25].

О структуре ПФ вскоре стало известно из обзорных статей и монографий; например, в монографии Крекнела и Вонга [26] достаточно полно приведены результаты изучения ПФ металлов. Оказалось, что почти у всех металлов, кроме щелочных и полуметаллов типа висмута, ПФ открыты и достаточно сложны. Тем не менее их можно сконструировать с помощью простых топологических элементов в виде гофрированных цилиндров и гофрированных плоскостей. Согласно результатам исследования в лаборатории Алексеевского, ПФ благородных металлов представляет собой пространственную сетку из гофрированных цилиндров, а ПФ олова состоит из гофрированных плоскостей, попарно соединённых перемычками.

Сопротивление поликристаллического проводника типа золота, усреднённое по различным ориентациям кристаллитов Стаковяком [27], увеличивалось с возрастанием сильного магнитного поля пропорционально  $H^{4/3}$ . Этот результат позднее был получен московскими теоретиками Дыхне и Дрейзином [28] более изящным и строгим методом. Таким образом, квадратичная зависимость от  $H$  сопротивления поликристаллических образцов металлов с открытой ПФ при возрастании магнитного поля сменяется зависимостью с более медленным возрастанием, близким к линейному, что и наблюдал Капица.

За последние 25 лет значительно возрос интерес к гальваномагнитным явлениям в достаточно сложных комплексах переноса заряда, обладающих металлическим типом проводимости, в частности слоистых проводниках с квазидвумерным электронным энергетическим спектром. Этот интерес был стимулирован обнаружением в одной из модификаций органического проводника  $\beta$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>IBr<sub>2</sub>, обладающей слоистой

структурой, весьма яркого проявления эффекта Шубникова – де Гааза в области магнитных полей до 14 Тл [29, 30]. Весьма необычной в таких сильных полях оказалась зависимость магнетосопротивления поперёк слоёв от ориентации магнитного поля [30]. В зависимости магнетосопротивления от угла  $\theta$  между вектором  $\mathbf{H}$  и нормалью к слоям  $\mathbf{n}$  наблюдались достаточно острые максимумы, положение которых периодически повторялось как функция  $\tan \theta$  во всей области углов, кроме небольшой окрестности вблизи  $\theta = \pi/2$ .

В слоистых проводниках замкнутые изоэнергетические поверхности в импульсном пространстве возможны лишь вблизи нижнего и верхнего краёв зоны проводимости, а все остальные изоэнергетические поверхности, включая ПФ, открыты. Это связано с тем, что энергия носителей заряда

$$\begin{aligned} \varepsilon(p) &= \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n(p_x, p_y) \cos\left(\frac{anp_z}{\hbar} + \alpha_n(p_x, p_y)\right), \\ \varepsilon_n(-p_x, -p_y) &= \varepsilon_n(p_x, p_y), \quad \alpha_n(-p_x, -p_y) = -\alpha_n(p_x, p_y), \end{aligned} \quad (1)$$

где расстояние между слоями  $a$  слабо зависит от проекции импульса  $p_z = \mathbf{p}\mathbf{n}$  на нормаль к слоям  $\mathbf{n}$ , что обеспечивает резкую анизотропию их электропроводности: поперёк слоёв электропроводность на несколько порядков меньше, чем вдоль них. Скорость движения носителей заряда вдоль нормали к слоям

$$v_z = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{an}{\hbar} \varepsilon_n(p_x, p_y) \sin\left(\frac{anp_z}{\hbar} + \alpha_n(p_x, p_y)\right) \leq \eta v_F \quad (2)$$

значительно меньше характерной фермиевской скорости электронов вдоль слоёв  $v_F$ ; здесь параметр квазидвумерности проводника  $\eta$  — отношение максимального значения  $v_z$  на ПФ к  $v_F$ .

Поверхность Ферми слоистых проводников является слабо гофрированной вдоль оси  $p_z$ , она может быть многолистной и состоять из топологически различных элементов в виде слабогофрированных цилиндров и слабогофрированных плоскостей в импульсном пространстве. Обнаружение квантовых осцилляций Шубникова – де Гааза практически во всех ныне синтезированных слоистых органических проводниках свидетельствует о том, что хотя бы один лист ПФ в таких проводниках представляет собой цилиндр, поперечное сечение которого помещается в элементарной ячейке импульсного пространства. В случае периодического движения заряда в магнитном поле с периодом  $T_H$  компоненты тензора электропроводности, связывающие плотность тока с электрическим полем  $\mathbf{E}$ , имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= - \frac{2e^2 H}{c(2\pi\hbar)^3} \int d\varepsilon \frac{\partial f_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \int dp_H \int_0^{T_H} dt v_i(t) \times \\ &\times \int_{-\infty}^t dt' v_j(t') \exp\left(\frac{t' - t}{\tau}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $e$  — заряд,  $f_0(\varepsilon)$  — равновесная фермиевская функция распределения электронов проводимости,  $t$  — время движения заряда в магнитном поле.

В основном приближении по малому параметру  $\eta$  сопротивление току поперёк слоёв равно обратной величине  $\sigma_{zz}$ . В магнитном поле  $\mathbf{H} = (0, H \sin \theta, H \cos \theta)$

асимптота компоненты  $\sigma_{zz}$  при  $\eta \ll 1$  имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= \sum_0^{\infty} \int_0^T dt \int_{-\infty}^t dt' \left(\frac{an}{\hbar}\right)^2 \varepsilon_n(t) \varepsilon_n(t') \exp\left(\frac{t' - t}{\tau}\right) \times \\ &\times \frac{e^3 H \cos \theta}{ac(2\pi\hbar)^2} \cos \left[ \frac{an}{\hbar} (p_y(t) - p_y(t')) \tan \theta \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где все подынтегральные функции зависят лишь от  $t$  и  $t'$ . В достаточно сильном магнитном поле, где за время свободного пробега электрон успевает совершить много оборотов, т.е.  $\gamma = T/\tau \ll 1$ , компонента тензора электропроводности  $\sigma_{zz}$  с учётом малых поправок по параметрам  $\gamma \ll 1$  и  $\eta \ll 1$  принимает следующий вид:

$$\sigma_{zz} = \frac{ae^2 m^* \tau \cos \theta}{2\pi\hbar^4} \sum_n n^2 I_n^2(\theta) + \eta^2 \sigma_0 (\eta^2 \varphi_1 + \gamma^2 \varphi_2), \quad (5)$$

$$I_n(\theta) = T^{-1} \int_0^T dt \varepsilon_n(t) \cos \left( p_y(t) an \frac{\tan \theta}{\hbar} \right), \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  — электропроводность вдоль слоёв в отсутствие магнитного поля, функции  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  порядка единицы.

Функции  $I_n(\theta)$  имеют множество нулей, которые при  $\tan \theta \gg 1$  периодически повторяются с периодом  $A(\tan \theta) = 2\pi\hbar/n a D_p$ , где  $D_p$  — диаметр поперечного сечения ПФ вдоль оси  $p_y$  [31]. В результате исследование угловых осцилляций магнетосопротивления при различных ориентациях магнитного поля позволяет полностью восстановить форму слабогофрированного цилиндра. В случае многолистной ПФ вклад в осцилляционную зависимость сопротивления вносят также носители заряда на плоском листе ПФ, а по периодам этих осцилляций можно определить величину его гофрировки [32].

При  $\theta = \pi/2$  основной вклад в компоненту тензора электропроводности  $\sigma_{zz}$  вносит небольшая доля электропроводности с орбитами вблизи самопересекающейся сечения ПФ  $p_H = p_c$ . Эти носители заряда медленно движутся вдоль оси  $z$  с периодом  $T(p_H)$ , сравнимым с временем их свободного пробега  $\tau$  или большим его при сколь угодно большой величине магнитного поля. Малая скорость  $v_x = \partial \varepsilon / \partial p_x$  на электронных орbitах с  $p_H = p_y$ , близким к  $p_c$ , соответствует слабой зависимости  $\varepsilon$  от  $p_x$ , и мы вправе в этом случае при вычислении периода движения электрона  $T(p_H)$  воспользоваться разложением энергии в степенной ряд по малым  $p_x$ . Опуская старшие гармоники в формуле (1), получим

$$\varepsilon = \varepsilon_0(0, p_y) + \frac{p_x^2}{2m_1} + \varepsilon_1(0, p_y) \cos \frac{ap_z}{\hbar}. \quad (7)$$

Воспользовавшись соотношением (7), легко вычислить период движения электрона по орбитам, близким к самопересекающимся,

$$T(p_y) = \eta^{-1/2} T(0) \int_0^\pi d\xi (\xi^2 + \sin^2 \alpha)^{-1/2}, \quad (8)$$

где

$$\xi^2 = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0(0, p_y) - \varepsilon_1(0, p_y)}{2\varepsilon_1(0, p_y)}. \quad (9)$$

При приближении к самопересекающейся орбите  $\xi$  становится сколь угодно малой величиной и интеграл в формуле (8) расходится как  $\ln(1/\xi)$ . В квазидвумерном проводнике условие  $T > \tau$  выполнимо в более широкой

области электронных орбит, чем в обычных металлах, поскольку период движения электронов вблизи само-пересекающейся орбиты даже при  $\xi \sim 1$  обратно пропорционален малому параметру  $\eta^{1/2}$ .

При  $\eta^{1/2} \leq \gamma_0 = T(0)/\tau \ll 1$  электропроводность попе-рёк слоёв

$$\sigma_{zz} = \eta^2 \sigma_0 \gamma_0^2, \quad (10)$$

с возрастанием магнитного поля убывает пропорционально  $1/H$ . В предельно сильном магнитном поле, когда  $\gamma_0 \ll \eta$ , уменьшается доля электронов, для которых  $T > \tau$ , и с увеличением  $H$  линейное возрастание сопротивления монокристаллического образца сме-няется квадратичным. При этом вклад в  $\sigma_{zz}$  небольшой доли носителей заряда на открытых сечениях ПФ вблизи самопересекающейся орбиты,

$$\sigma_{zz} = \eta^{3/2} \sigma_0 \gamma_0^2, \quad (11)$$

всё же превышает вклад в  $\sigma_{zz}$  всех остальных электронов проводимости [33, 34]. Формулы (10), (11) справедливы и при небольшом отклонении магнитного поля от поверхности слоёв, когда  $\eta \tan \theta \gg 1$  и имеются самопересекаю-щиеся сечения гофрированного цилиндра. При  $\eta \tan \theta \leq 1$  магнетосопротивление уже немонотонно зависит от угла  $\theta$  [35], и при  $1 \ll \tan \theta \ll 1/\eta$  происходит переход к строго осцилляционной зависимости.

В некоторых соединениях на основе тетратиафульва-лена возможен магнитный пробой между листами ПФ (см., например, [36]). В этом случае движение носителей заряда является сложным и запутанным. Если вероятность магнитного пробоя  $w$  мала, а именно  $w < T/\tau$ , т.е. за время свободного пробега электрон может совершить лишь один переход с одного листа ПФ на другой, то возможность восстановления формы слабогофрирован-ного цилиндра, а также определение гофрировки плос-кого листа ПФ остаются такими же, как и при  $w = 0$ . Однако при  $w \gg T/\tau$  вклад в электропроводность носи-телей заряда, совершающих хаотическое движение, асимптотически оказывается таким же, как и в случае, когда электрон неизбежно меняет лист ПФ при появле-нии такой возможности. При этом возникают комбини-рованные частоты угловых осцилляций сопротивления.

Автор выражает признательность А.Ф. Андрееву, Ю.В. Копаеву и Е.Г. Николаеву за приглашение принять участие в сессии Отделения физических наук РАН, посвящённой 100-летию со дня рождения Н.Е. Алексеев-ского.

## Список литературы

1. Lifshitz I M, Peschanski V G ЖЭТФ **35** 1251 (1958) [Lifshitz I M, Peschanskii V G Sov. Phys. JETP **8** 875 (1959)]
2. Kapitza P Proc. R. Soc. Lond. A **119** 358 (1928)
3. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П ЖЭТФ **35** 554 (1958) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **8** 383 (1959)]
4. Justi E, Scheffers H Phys. Z. **37** 383 (1936); Phys. Z. **37** 475 (1936)
5. Лазарев Б Г, Нахимович Н М, Парфенова Е А ЖЭТФ **9** 1169 (1939)
6. Justi E Phys. Z. **41** 503 (1940)
7. Sommerfeld A, Bethe H Elektronentheorie der Metalle (Berlin: Springer, 1933)
8. Lifshitz I M, Peschanski V G ЖЭТФ **38** 188 (1960) [Lifshitz I M, Peschanskii V G Sov. Phys. JETP **11** 137 (1960)]
9. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П, Лифшиц И М, Песчан-ский В Г ЖЭТФ **39** 1201 (1960) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P, Lifshitz I M, Peschanskii V G Sov. Phys. JETP **12** 837 (1961)]
10. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П ЖЭТФ **36** 447 (1959) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **9** 311 (1959)]
11. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П ЖЭТФ **37** 672 (1959) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **10** 481 (1960)]
12. Гайдуков Ю П ЖЭТФ **37** 1281 (1959) [Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **10** 913 (1960)]
13. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П ЖЭТФ **38** 1720 (1960) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **11** 1242 (1960)]
14. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П ЖЭТФ **41** 354 (1961) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **14** 256 (1961)]
15. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П ЖЭТФ **42** 69 (1962) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **15** 49 (1962)]
16. Алексеевский Н Е, Гайдуков Ю П ЖЭТФ **43** 2094 (1962) [Alekseevskii N E, Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **16** 1481 (1962)]
17. Алексеевский Н Е, Егоров В С, Казак Б Н ЖЭТФ **44** 1116 (1963) [Alekseevskii N E, Egorov V S, Kazak B N Sov. Phys. JETP **17** 752 (1963)]
18. Алексеевский Н Е, Егоров В С ЖЭТФ **46** 1205 (1964) [Alekseevskii N E, Egorov V S Sov. Phys. JETP **19** 815 (1964)]
19. Алексеевский Н Е, Карстенс Г Э, Можаев В В ЖЭТФ **50** 1202 (1966) [Alekseevskii N E, Karstens G E, Mozhaev V V Sov. Phys. JETP **23** 798 (1966)]
20. Алексеевский Н Е, Михайлов Н Н ЖЭТФ **46** 1979 (1964) [Alekseevskii N E, Mikhailov N N Sov. Phys. JETP **19** 1333 (1964)]
21. Гайдуков Ю П ЖЭТФ **49** 1049 (1965) [Gaidukov Yu P Sov. Phys. JETP **22** 730 (1966)]
22. Алексеевский Н Е, Егоров В С Письма в ЖЭТФ **1** (5) 31 (1965) [Alekseevskii N E, Egorov V S JETP Lett. **1** 141 (1965)]
23. Алексеевский Н Е и др. Письма в ЖЭТФ **6** 637 (1967) [Alekseevskii N E et al. JETP Lett. **6** 132 (1967)]
24. Алексеевский Н Е, Карстенс Г Э, Можаев В В, в сб. Труды X Между. конф. по физике низких температур Т. 3 (М.: ВИНИТИ, 1967) с. 169
25. Алексеевский Н Е, Егоров В С ЖЭТФ **55** 1153 (1968) [Alekseevskii N E, Egorov V S Sov. Phys. JETP **28** 601 (1969)]
26. Cracknell A P, Wong K C The Fermi Surface. Its Concept, Determination, and Use in the Physics of Metals (Oxford: Clarendon Press, 1973)
27. Stachowiak H Acta Phys. Polonica **26** 217 (1964)
28. Дрейзин Ю А, Дыхне А М Письма в ЖЭТФ **14** 101 (1971) [Dreizin Yu A, Dykhne A M JETP Lett. **14** 66 (1971)]
29. Карповник М В и др. Письма в ЖЭТФ **47** 302 (1988) [Kartsovnik M V et al. JETP Lett. **47** 363 (1988)]
30. Карповник М В и др. Письма в ЖЭТФ **48** 498 (1988) [Kartsovnik M V et al. JETP Lett. **48** 541 (1988)]
31. Peschansky V G, Roldan Lopez J A, Yao T G J. Phys. I France **1** 1469 (1991)
32. Кириченко О В, Песчанский В Г ФНТ **37** 925 (2011) [Kirichenko O V, Peschansky V G Low Temp. Phys. **37** 734 (2011)]
33. Песчанский В Г ФНТ **23** 47 (1997) [Peschansky V G Low Temp. Phys. **23** 35 (1997)]
34. Peschansky V G Phys. Rep. **288** 305 (1997)
35. Карповник М В, Песчанский В Г ФНТ **31** 249 (2005) [Kartsovnik M V, Peschansky V G Low Temp. Phys. **31** 185 (2005)]
36. Andres D et al. ФНТ **37** 959 (2011) [Low Temp. Phys. **37** 762 (2011)]

PACS numbers: 01.60.+q, 01.65.+g, 74.25.-q  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302j.0216

## У истоков технической сверхпроводимости

Е.П. Краснопёров

Сверхпроводящие магнитные системы широко приме-няются в научном приборостроении, технике и медицин-ской диагностике. Ни одно серьёзное медицинское обсле-довование не обходится без магниторезонансной томографии, в которой величина поля определяет разрешение прибора. Материалом для получения сильных полей являются сверхпроводники 2-го рода, главным образом сплавы и интерметаллические соединения. Первые сверх-

**Е.П. Краснопёров.** Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Институт сверхпроводимости и физики твёрдого тела, Москва, РФ. E-mail: kep@isspp.kiae.ru

проводники 2-го рода были открыты и описаны Л.В. Шубниковым в Физико-техническом институте (ФТИ) в Харькове. К сожалению, термин *фаза Шубникова* редко упоминается в отечественной литературе, хотя исторически справедливо говорить "о фазе Шубникова, в которой Абрикосов предсказал вихревую структуру" [1]. Под руководством Л.В. Шубникова в 1930-е годы Н.Е. Алексеевский начинал первые эксперименты по сверхпроводимости. Он изучал разрушение сверхпроводимости под действием тока. Интерес к сверхпроводимости Н.Е. Алексеевский сохранил на всю жизнь, приложив много усилий для её практической реализации.

Я познакомился с Н.Е. Алексеевским, будучи студентом Московского физико-технического института (МФТИ), где Н.Е. Алексеевский возглавлял кафедру общей физики с 1960 по 1965 гг. Лекции он не читал, поскольку не чувствовал себя оратором, и избегал публичных выступлений. На кафедре он запомнился тем, что требовал от преподавателей обязательного участия в научных исследованиях. Под его руководством начинали научную карьеру сотрудники кафедры И.И. Игошин, Ю.А. Самарский (ныне проректор МФТИ) и многие другие.

После возвращения П.Л. Капицы в Институт физических проблем (ИФП) Н.Е. Алексеевский возглавил лабораторию, которая занималась исследованием сверхпроводимости и электронных свойств металлов. Такой симбиоз двух направлений был закономерным. Дело в том, что после создания теории сверхпроводимости Бардина – Купера – Шриффера существовало убеждение, что особенности ферми-поверхности могут явиться ключом к расчёту критической температуры. Современная теория может по нормальным свойствам материала объяснить обнаруженную сверхпроводимость, но, к сожалению, оказывается неспособной предсказать её и тем более определить температуру сверхпроводящего перехода  $T_c$ .

В лаборатории Алексеевского было всего пять штатных сотрудников: два лаборанта, два инженера и механик. Между тем широта исследований, которые проводились студентами, аспирантами и командированными, поражает. Отмечу только работы, относящиеся к сверхпроводимости. Прежде всего — это поиск новых сверхпроводников. Ежедневно приготавлялось несколько составов, которые спекались, сплавлялись, напылялись или создавались ещё каким-либо способом. Затем по сопротивлению или бесконтактным способом (на переменном токе) определялась возможная сверхпроводимость. Алексеевский постоянно сокрушался, что его конкурент Б.Т. Маттиас (США) имеет возможность изготавливать в 10 раз больше образцов, и поэтому ему чаще удаётся открывать новые сверхпроводники. В конце 1960-х годов оба учёных практически одновременно получили соединение  $Nb_3Al_{0,8}Ge_{0,2}$  с рекордно высокой тогда температурой  $T_c = 20,7$  К [2].

Для исследований электронных свойств металлов и критических параметров сверхпроводников были необходимы сильные поля. В начале 1960-х годов основными материалами для сверхпроводящих магнитов являлись провода из сплавов Nb-Zr и Nb-Ti. Эти сплавы были хрупкими, недостаточно стабильными и позволяли получать поля 5–7 Тл. В лаборатории Алексеевского сверхпроводящие магниты для самых разных целей наматывал каждый третий студент и аспирант. По-видимому, впервые в 1970 г. для ядерного магнитного резонанса (ЯМР) был изготовлен сверхпроводящий соленоид с полем  $H = 5,5$  Тл. Благодаря сверхпроводящему якорю магнит имел поразительно высокую стабильность: за неделю работы положение линии ЯМР не изменялось. Помню, Алексеевский написал отрицательное заключение на покупку французского патента стабилизированного источ-

ника тока для сверхпроводящих магнитов и очень этим гордился. Позднее совместно с Институтом физики им. Л.В. Киренского в Красноярске был создан ЯМР-спектрометр широких линий. Прибор демонстрировался на Всесоюзной выставке достижений народного хозяйства по случаю 250-летия Академии наук и получил золотую медаль.

Для нужд специальной связи были разработаны высокочастотные сверхпроводящие контуры с добротностью до  $10^5$ . В одном из научно-исследовательских институтов Ленинграда был изготовлен радиоприёмник со сверхпроводящим контуром, который был успешно испытан в лаборатории Алексеевского.

Много внимания Алексеевский уделял сверхпроводниковым генераторам для энергетики. Сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института электромашиностроения В.Н. Шахтарин нередко бывал в Лаборатории и обсуждал с Алексеевским многие проблемы, возникающие при создании машин.

Одной из важных тем Лаборатории являлось исследование свойств плёнок. Наибольший интерес представляли холодноосаждённые плёнки, которые в ряде случаев, как, например, бериллиевые, были сверхпроводящими и имели высокую критическую температуру  $T_c$ . На плёнках алюминия, полученных лазерным напылением, был обнаружен размерный эффект — зависимость  $T_c$  от толщины плёнки. Естественным приложением работ по плёнкам явилось создание сквидов. Алексеевский, который был хорошо известен в Германской Демократической Республике, вёл совместные работы с Йенским университетом по применению этих устройств в магнитометрии.

В 1961 г. происходит важное для прикладной физики событие. Дж. Кюнцлер [3] спрессовал в трубке смесь порошков ниобия и олова. После отжига при температуре 950 °C образовался известный интерметаллид  $Nb_3Sn$ , который обладал значительно более высокими критическими параметрами, чем сплавы ниобия с титаном и цирконием. Спустя два года Д. Мартин и М. Бенц изготовили из ниобиевой проволоки соленоид, который поместили в ванну с оловом при  $T = 900$  °C [4]. В результате твердофазной диффузии олова образовался слой  $Nb_3Sn$  и соленоид создал поле величиной 10 Тл при  $T = 1,8$  К. Алексеевский сразу же оценил перспективу нового материала. Он предложил получать слой  $Nb_3Sn$  на ниобиевой ленте и после изоляции ленты делать из неё галетные обмотки для соленоидов. Разработка технологии твердофазной диффузии олова с образованием сверхпроводящего слоя на ниобиевой ленте становится его главным увлечением на десять лет.

Поиск новых сверхпроводников, их исследование и разработки их применения принесли Алексеевскому заслуженную славу и авторитет, но стали и причиной горьких для него событий. И можно только удивляться, как мужественно он переносил удары судьбы. В 1967 г. он был вынужден покинуть пост председателя Совета по физике низких температур. И это в тот год, когда он стал лауреатом Государственной премии за работы по исследованию гальваномагнитных свойств металлов. Одной из причин смещения Алексеевского явилось его увлечение технологией сверхпроводников. Ему ставился в вину уклон деятельности Совета по физике низких температур в сторону разработки приложений вместо "высокой науки", декларируемой в Академии.

При участии Н.Н. Михайлова (руководителя химической лаборатории ИФП) был создан стенд для получения ленты с Nb-Sn-слоем. Стенд имел внушительные размеры, к работе на нём привлекались многие химики. Одновременно работы над этой технологией начались в Централь-

ном научно-исследовательском институте им. И.П. Бардина, Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова и Физико-техническом институте низких температур (ФТИНТ) (Харьков). Но в ИФП научное сообщество негативно отнеслось к подобной "индустриализации сверхпроводимости". П.Л. Капица отстранил Н.Н. Михайлова от руководства химической лабораторией и на его место назначил Г.Э. Карстенса, который был правой рукой Н.Е. Алексеевского. Парадокс, но в начале 1968 г. все работы с Nb-Sn-лентой в ИФП были остановлены. Н.Н. Михайлов перешёл в Курчатовский институт, где при поддержке А.П. Александрова была специально создана технологическая лаборатория для получения сверхпроводящей ленты. Потеря двух помощников и любимого детища явилась тяжелейшим ударом, но Алексеевский его выдержал! Иногда приходится слышать, что он был суровым человеком, порой угрюмым. Пожалуй, это справедливо, поскольку невозможно сохранить жизнерадостность и оптимизм при таких поворотах судьбы.

Осознавая важность прикладных исследований по сверхпроводимости, Алексеевский пишет записку в Академию наук СССР о необходимости создания ленты с критическим током плотностью до  $10^5$  А см<sup>-2</sup>. Такая лента была нужна для строящихся ускорителей, исследовательских магнитов с сильным полем и энергетики.

В рамках составления прогнозов по важнейшим научным направлениям 27 сентября 1968 г. выходит постановление Президиума АН СССР № 632 "Перспективы исследований в области сверхпроводимости, создания сверхпроводящих материалов и использования этого явления в науке и технике". В соответствии с этим постановлением была организована временная Комиссия по сверхпроводимости под председательством Н.Е. Алексеевского.

Через год, 18 июля 1969 г., Алексеевский выступает на Президиуме АН СССР с докладом "О перспективах исследований в области сверхпроводимости, создания сверхпроводящих материалов и использования этого явления в науке и технике". (Я помогал Алексеевскому демонстрировать рисунки и этот день помню очень хорошо.)

*Обширный доклад включает в себя* вопросы поиска новых сверхпроводников, особенно высокотемпературных (тогда речь шла о температурах выше 25 К!), касается направлений теоретического исследования самого явления и наиболее подробно освещает проблемы применения сверхпроводимости в энергетике, линиях передач, накопителях, электромашинах. Демонстрируется использование сверхпроводимости в крупных магнитных системах ускорителей (тогда широко строящихся). Оцениваются потребности в сверхпроводящих материалах для одного ускорителя, термоядерной станции и магнитогидродинамического генератора, которые составляют внушительные величины: 10–50, 60 и 7 т соответственно. Отмечается важность разработок криогенных мощностей, подчёркивается необходимость в значительном увеличении в стране добычи газообразного гелия для криогенных нужд.

#### *Доклад одобрен.*

Слово берёт П.Л. Капица, директор ИФП АН СССР. В обычной неспешной манере Капица отмечает, что сверхпроводимость стала очень широкой областью и предлагает выделить главные направления, на которых необходимо сосредоточить основные ресурсы. Президент АН СССР М.В. Келдыш резко прерывает Капицу и напоминает историю с водородным ракетным двигателем: "В своё время мы приняли Постановление о закрытии всех работ с водородом из-за его опасности. Сейчас в США запущен Сатурн-5, а у нас не осталось ни одной лаборатории, которая могла бы работать с водородом". Капица парирует, что водород менее опасен, чем кислород (он с ним

много работал). "Водород не взрывается, — говорит Капица, — пока не приготовлена смесь". Ссылается на Алексеевского, который постоянно работает с жидким водородом, испытывая новые сверхпроводники.

*Диспут останавливает* А.П. Александров. Он говорит, что Министерство среднего машиностроения и Курчатовский институт займутся разработкой и производством сверхпроводящих материалов. Рассказывает, какие имеются возможности и обрисовывает состояние дел. Тем самым разрешён главный вопрос о сверхпроводящем проводе. Далее Президиум обсуждает менее важные проблемы развития и применения сверхпроводников.

1 августа 1969 г. выходит постановление Президиума № 751. Пункт IX гласит: «Одобрить основные положения доклада член-корр. АН СССР Н.Е. Алексеевского "Перспективы развития исследований в области сверхпроводимости, создания сверхпроводящих материалов и использования этого явления в науке и технике", подготовленного комиссией по разработке прогнозов развития сверхпроводимости. Создать при Секции физико-технических и математических наук Президиума АН СССР постоянную Комиссию по сверхпроводимости для координации научных исследований, научно-технических разработок в этой области».

Комиссии предстояло курировать широкий круг исследований по сверхпроводимости, поиску новых сверхпроводников и развитие прикладных направлений. Для одиннадцати институтов АН СССР (Институт высоких давлений, Институт физики твёрдого тела, Физический институт им. П.Н. Лебедева, ИФП, ФТИНТ, Институт химической физики, Институт высоких температур и др.) Президиум АН СССР сформулировал конкретные задания по всему спектру исследований и применений сверхпроводимости. Комиссию по сверхпроводимости возглавил А.П. Александров как член Президиума. Поскольку А.П. Александров отвечал за огромную атомную отрасль, то вся работа Комиссии по сверхпроводимости легла на плечи его заместителя — Н.Е. Алексеевского.

Одновременно Президиум АН СССР обратился в Государственный комитет Совета Министров СССР по науке и технике с рекомендацией значительно расширить производство сверхпроводящих проводов и устройств на их основе. Теперь, казалось бы, открылись все пути для Nb-Sn-ленты, тем более что предприятия General Electric (США) начали разрабатывать технологию нанесения на ленту Nb<sub>3</sub>Sn покрытия из газовой фазы. Метод твердофазной диффузии представлялся сначала более простым, но всё оказалось гораздо сложнее: олово, через которое протягивалась ниобиевая лента, загрязнялось, возможно, из-за недостаточной чистоты ниobia, и в результате не удавалось получать длинные образцы сверхпроводника с одинаково высокими критическими параметрами. Позднее обнаружился и ещё один недостаток, присущий самой ленте.

В 1974 г. фирма Intermagnetics привезла в Москву сверхпроводящие магниты с обмотками в виде галет Nb-Sn, изготовленных из ленты General Electric. Магниты создавали поле 17,5 Тл. Это было феноменально. Но вскоре выяснилось, что галетные обмотки не очень надёжны. После нескольких переходов в нормальное состояние (а они неизбежны) сверхпроводник необратимо деградирует и поле снижается на 2–3 Тл. Причиной этого явилась низкая прочность ниobia, который был основой ленты. Это сильно "подмочило" репутацию ленты, и в гонке за экономией она вскоре проиграла новой, "бронзовой", технологии.

Суть "бронзовой" технологии состоит в том, что в матрицу из оловянной бронзы (Cu + 13 % Sn) помещают

ниобиевые стержни. Этую заготовку подвергают волочению для достижения нужного диаметра провода. Полученный таким способом многожильный провод покрывают термостойким изолятором и наматывают соленоид. Изготовленную обмотку помещают в печь при  $T = 900^\circ\text{C}$ . Олово диффундирует из бронзы, и на поверхности ниobia формируется микрометровый слой  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ . Технология изготовления исходного провода стала проще, а изготовление магнитов усложнилось. В СССР инициаторами "бронзовой" технологии стали сотрудники Всесоюзного научно-исследовательского института неорганических материалов (ныне — Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара) В.Я. Филькин, А.Д. Никулин и А.К. Шиков. Сейчас эта технология является основной в производстве сверхпроводящих многожильных проводов для магнитных систем с большим полем. И хотя магниты с проволочной обмоткой имеют поле на 1–2 Тл меньшее, чем ленточные (галетные), они являются более надёжными и стабильными. У "бронзовой" технологии оказалось несколько важных преимуществ: отсутствие в диффузионном слое других станидов помимо  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , высокая прочность многожильного провода, автоматически обеспечивающаяся токовая и магнитная стабилизация, высокая тококонесущая способность и, главное — сохранение незменности параметров на большой длине провода.

В середине 1970-х годов работы над ленточными сверхпроводниками были свёрнуты. Лишь с появлением высокотемпературных сверхпроводников интерес к ним вернулся. Если использовать современные технологии и применять многослойную (упрочнённую) ниобиевую ленту, то, вполне возможно, способ получения сверхпроводящей ленты с помощью твердофазной диффузии, который начал разрабатывать Н.Е. Алексеевский, может вновь возродиться.

Автор благодарен Е. Николаеву за поиск архивных материалов АН СССР.

## Список литературы

1. Buckel W *Supraleitung. Grundlagen und Anwendung* (Weinheim: Physik-Verlag, 1972) [*Super-conductivity. Fundamentals and Applications* (Weinheim: VCH, 1991); Буккель В *Сверхпроводимость. Основы и приложения* (М.: Мир, 1975)]
2. Алексеевский Н Е, Агеев Н В, Михайлов Н Н, Шамрай В Ф *Письма в ЖЭТФ* 9 28 (1969) [Alekseevskii N E, Ageev N V, Mikhailov N N, Shamrai V F *JETP Lett.* 9 16 (1969)]
3. Kunzler J E *Rev. Mod. Phys.* 33 501 (1961)
4. Martin D L et al. *Cryogenics* 3 161 (1963)

PACS numbers: 01.65.+g, 07.55.Db, 84.71.Ba  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201302k.0219

## История создания и развития Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур

В.И. Нижанковский, В.И. Цебро

Отмечая 100-летие со дня рождения выдающегося учёного-физика, члена-корреспондента АН СССР Николая Евгеньевича Алексеевского, крупнейшего специалиста в

**В.И. Нижанковский.** Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва, РФ  
**В.И. Цебро.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ. E-mail: tsebro@sci.lebedev.ru

области сверхпроводимости, физики низких температур и физики металлов, нельзя не отметить тот огромный вклад, который Николай Евгеньевич внёс в дело организации и развития Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (МЛ) во Вроцлаве. Достижения Н.Е. Алексеевского в указанных выше областях физики общизвестны и признаны. Если говорить о научно-организационной деятельности Н.Е. Алексеевского, которая включала его интенсивную работу в ряде советов и комиссий, в том числе международных<sup>1</sup>, то самым крупным достижением Николая Евгеньевича как учёного-организатора, безусловно, является создание в 1968 г. Международной лаборатории и активное, в течение четверти века, участие в её развитии.

Побудительные мотивы, которые заставили Н.Е. Алексеевского с энтузиазмом взяться за эту трудную, отнимающую много времени от любимого занятия самой наукой, работу изложены в самом начале его статьи (в соавторстве с Е.П. Краснопёровым) в сборнике [1], посвящённом многостороннему сотрудничеству академий наук социалистических стран, вышедшем в 1978 г., в год 10-летия МЛ: "Развитие современной физики твёрдого тела в значительной мере зависит от возможности проведения исследований в сильных магнитных полях и при низких температурах. Экспериментальные установки для таких исследований в большинстве случаев являются достаточно дорогими. Их коллективное использование позволяет снизить затраты на проведение дорогостоящих экспериментов, избежать параллелизма, а также использовать опыт, накопленный в разных странах, иными словами, приводит к повышению эффективности научных исследований. Научные разработки, требующие сложного и дорогостоящего оборудования, при таком решении вопроса становятся доступными для всех стран, открывая перед ними возможность проведения актуальных фундаментальных исследований".

Идея создания Международной лаборатории, согласно воспоминаниям Ч. Базана, который с начала её основания в 1968 г. и до ухода на пенсию в 1985 г. был заведующим МЛ, принадлежала польской стороне. Ч. Базан в мемуарах, опубликованных в сборнике [2], пишет: "Сама идея создания такой лаборатории исходила, по-видимому, от польского физика профессора Романа Ингардена. В 50-х годах он организовал во Вроцлаве лабораторию низких температур ПАН и посещал низкотемпературные центры в Европе, в том числе в Москве и Харькове. Таким образом он познакомился с Н.Е. Алексеевским, и они уже тогда смогли провести предварительные дискуссии о целесообразности создания МЛ... Официальное предложение было изложено на очередном заседании комиссии экспертов СЭВ в Минске в 1964 г... Идея создания лаборатории встретила горячую поддержку Николая Евгеньевича, и он сразу занялся претворением её в жизнь..."

Следует отметить, что выбор места для будущей Международной лаборатории был в значительной степени не случаен и созданию МЛ во Вроцлаве способствовали определённые благоприятные обстоятельства. Во-первых, во Вроцлаве при Институте низких температур и струк-

<sup>1</sup> С 1952 по 1954 гг. и с 1962 по 1967 гг. Н.Е. Алексеевский возглавлял Научный совет по проблеме "Физика низких температур", много лет являлся председателем Комиссии по сверхпроводимости при Секции физико-технических и математических наук Президиума АН СССР, а с 1966 по 1972 г. был представителем СССР в Комиссии сверхнизких температур Международной ассоциации фундаментальной и прикладной физики (IUPAP).



Рис. 1. Старое (а) и новое (б) здания МЛ. (Фотографии 2003 г.)

турных исследований Польской академии наук уже существовала занимавшаяся разработкой водоохлаждаемых магнитов лаборатория (возглавляемая Р. Ингарденом), в которой с 1961 г. проводились эксперименты в магнитном поле 4 Тл биттеровского соленоида. Кроме того, к 1968 г., когда начала функционировать МЛ, К. Тройнаром, который станет в ней главным конструктором биттеровских соленоидов [3], уже был спроектирован соленоид с магнитным полем 10 Тл. Во-вторых, в городе благодаря переводу трамвайной сети на систему выпрямителей освобождались мотор-генераторы общей мощностью около 9 МВт, и Вроцлавское отделение электросети передало Польской академии наук здание станции (рис. 1а) по преобразованию переменного тока вместе с моторами-генераторами (рис. 2), переключателями и трансформаторами. И, наконец, не было никаких проблем с обеспечением экспериментов жидким гелием — имелись гелиевый охладитель фирмы Philips и дешёвый гелий (в залежах природного газа близ Вроцлава было обнаружено очень высокое содержание гелия, и его стали добывать и охаживать впоследствии в промышленном масштабе).

После многочисленных предварительных консультаций и согласований 11 мая 1968 г. представители четырёх академий наук — Народной Республики Болгарии, Германской Демократической Республики, Польской Народной Республики и Союза Советских Социалистических Республик — подписали "Соглашение об учреждении Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур" в целях проведения теоретических и экспериментальных исследований в области сильных ста-



Рис. 2. Зал моторов-генераторов для питания биттеровских соленоидов в старом здании МЛ (современный вид).

ционарных магнитных полей и низких температур. Соглашение определяло организационные принципы руководства и основные направления работ МЛ. Руководство деятельностью МЛ было возложено на коллективный орган — Совет Международной лаборатории, а также её директора. На первом заседании Совета МЛ председателем Совета был избран Н.Е. Алексеевский, а её первым директором стал В. Тшебятовский<sup>2</sup>, один из активных инициаторов создания МЛ. В протоколе к Соглашению об учреждении МЛ размер долевого участия на покрытие расходов, связанных с проведением научных исследований, определялся следующим образом: Болгарская академия наук — 8 %, Немецкая академия наук в Берлине Германской Демократической Республики — 25 %, Польская академия наук — 26 % и Академия наук СССР — 41 %.

Согласно статье III Соглашения, основными задачами МЛ являлись:

- исследование свойств сверхпроводников, новых сверхпроводящих систем, формы поверхности Ферми металлов, электронной структуры магнитных материалов, взаимодействий магнитных моментов ядер в твёрдом теле;
- получение самых низких температур и развитие методов адиабатического размагничивания;
- развитие методов создания сильных магнитных полей;
- разработка конструкций бесстержневых электромагнитов, охлаждающихся водой или конденсированными газами;
- проведение метрологических работ в области сильных магнитных полей и низких температур.

Наиболее значимые даты и этапы деятельности МЛ с момента её основания и до наших дней приведены на сайте лаборатории (табл. 1) [4].

<sup>2</sup> Тшебятовский (Trzebiatowski) Владзимеж (1906–1982) — польский химик, иностранный член АН СССР (1976), академик (1952) и президент (1972–1977) Польской академии наук. В 1966–1967 гг. вместе с Р. Ингарденом организует во Вроцлаве Институт низких температур и структурных исследований Польской академии наук, которым руководит до своей кончины в 1982 г. Автор трудов по неорганической и физической химии, технологии цветных и редких металлов, магнетизму редкоземельных и урановых соединений.

**Таблица 1.** Этапы развития деятельности Международной лаборатории

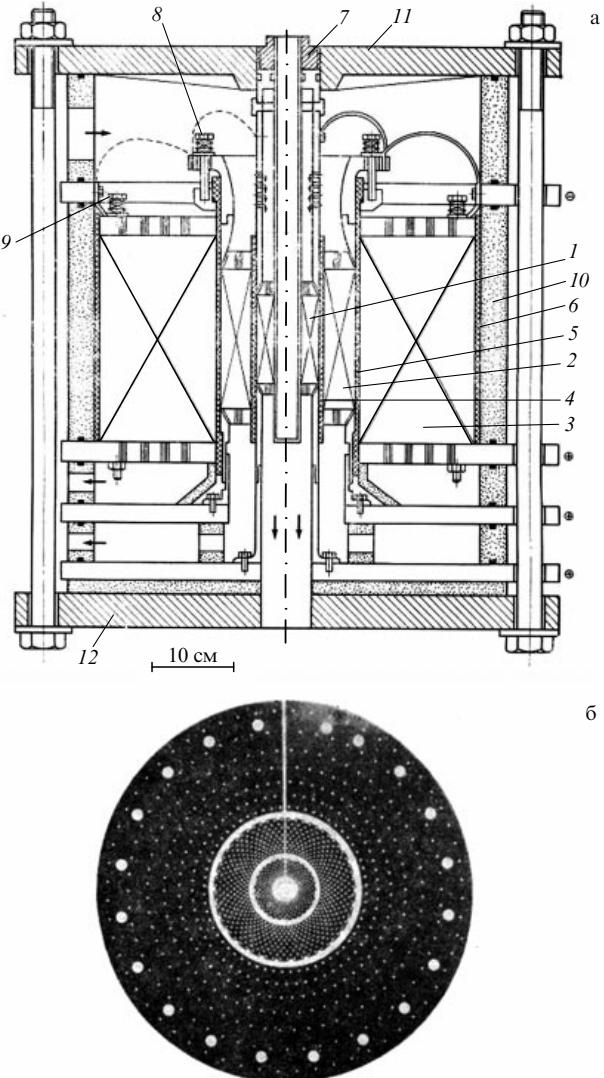
1964 г.	Идея создания лаборатории (Роман Ингарден)
1968 г.	Подписание Соглашения о создании МЛ между странами участниками СЭВ — НРБ, ГДР, ПНР и СССР
1975–1980 гг.	Ввод в строй биттеровского магнита (20 Тл) и импульсного магнита (48 Тл)
1982–1985 гг.	Развитие идеи существенной модернизации лаборатории
1988–1989 гг.	Начало модернизации, предполагающей получение постоянного магнитного поля величиной до 30 Тл и переход на тиристорные источники питания
1993–1994 гг.	Изменение вектора развития в сторону создания квазистационарных магнитных полей с длительным временем импульса
1999–2001 гг.	Частичное выполнение процесса модернизации. Ввод в строй нового лабораторного корпуса
2002–2005 гг.	Конструирование и запуск серии квазистационарных магнитов
2004–2007 гг.	Существенное обновление приборного парка. Приобретение нового сверхпроводящего магнита (15 Тл)
2006 г.	Получение лабораторией статуса международного института Польской академии наук

**Таблица 2.** Биттеровские магниты Международной лаборатории

Тип магнита	Максимальное поле, кЭ	Диаметр рабочего отверстия, см	Мощность, МВт	Съём тепла, Вт см <sup>-2</sup>	Год ввода в строй
E40*	43	8,5	1,5	218	1961
E100	90	4,3	1,8	450	1969
E150	145	3,4	4,2	540	1971
E200	185	2,5	5,2	660	1975

\* Демонтирован в 1973 г. (см. [5]).

На первом этапе основные усилия сотрудников МЛ были сосредоточены на развитии методов создания сильных магнитных полей с помощью биттеровских водоохлаждаемых магнитов и на конструировании магнитов различной мощности как основы экспериментальной базы лаборатории. В результате к 1975 г. в МЛ были последовательно введены в эксплуатацию несколько биттеровских магнитов (табл. 2), в том числе самый крупный трёхсекционный магнит E200 (рис. 3, 4). Параллельно проводилась большая исследовательская работа по усовершенствованию водоохлаждаемых магнитных систем. Так, с целью достижения максимального поля при заданной мощности было изучено влияние охлаждающих отверстий в медных дисках соленоида на коэффициент его эффективности и найдено оптимальное их распределение [6]. Специалистами из Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения АН СССР было предложено модифицировать традиционную биттеровскую конструкцию, заменив разборные диски компаундированными эпоксидной смолой галетами. Проведённые в МЛ эксперименты показали, что в каналах, охлаждающих галеты, теплосъём выше и, кроме того, такая конструкция способна выдержать большие механические нагрузки [8].



**Рис. 3.** (а) Поперечное сечение биттеровского магнита E200: 1 — внутренняя, 2 — средняя и 3 — внешняя секции, 4–6 — изоляционные трубы, 7 — гайка, 8 — болты, 9 — изолированные шпильки, 10 — корпус, 11 — верхняя и 12 — нижняя крышки. (б) Конфигурация биттеровских пластин.

Однако в конечном итоге компаундированные галеты себя не оправдали, поскольку срок их эксплуатации оказался небольшим<sup>3</sup>. Однако целиком и полностью оправдала себя другая идея красноярских учёных Б. Хрусталёва, Ю. Кочарова и Ю. Катрухина — использовать для трёхсекционного магнита E200 в качестве внутренней секции катушки типа "полигеликс" [9]. В этом случае в магните E200 было получено максимальное поле 207 кЭ (вместо 185 кЭ (см. табл. 2)), но, главное, срок службы секции составил 15 лет (!).

Помимо водоохлаждаемых магнитных систем, в МЛ использовались и сверхпроводящие соленоиды. Один из них (изготовленный по заказу МЛ в 1975 г. из ниобий-

<sup>3</sup> Как вспоминает в мемуарах К. Тройнар [3]: "...на конференции по магнитным технологиям, которая состоялась в Гренобле в 1983 г., мы узнали от сотрудников лаборатории им. Ф. Биттера Массачусетского технологического института (МИТ), что там также занимались этой задачей и также не достигли успеха".



Рис. 4. (а) Биттеровский магнит Е150. (б) Магниты Е150 и Е200 (современный вид).

оловянной ленты фирмой Intermagnetics<sup>4</sup>), создающий поле до 15 Тл, используется и сейчас. Для измерений теплоёмкости в МЛ был изготовлен другой сверхпроводящий соленоид из ниобий-титановой проволоки, создающий поля до 6 Тл и работающий в режиме замороженного потока. В качестве следующего шага развития методов получения сильных магнитных полей была запланирована постройка гибридного соленоида с магнитным полем 30 Тл. Внешнюю секцию (примерно на 10 Тл) предполагалось сделать из сверхпроводящего кабеля, а внутреннюю водоохлаждаемую (на 20 Тл) — из новых материалов с улучшенными изоляционными и механическими свойствами. (Увы, в силу многих, прежде всего экономических, причин этому проекту не суждено было осуществиться.)

Первое десятилетие функционирования МЛ характеризовалось интенсивными научными исследованиями по всем направлениям её деятельности. Наиболее интенсивно под руководством Н.Е. Алексеевского изучались сверхпроводящие системы с высокими критическими параметрами, такие как соединения со структурой А-15, а также тройные халькогениды молибдена. Научными организациями СССР и ГДР совместно с МЛ была разработана сверхпроводящая лента на основе соединения ниobia с оловом и кабель на основе соединения ванадия с галлием. В ниобий-оловянной ленте была достигнута рекордно

<sup>4</sup> Отметим, что это был один из первых пилотных образцов сверхпроводящих соленоидов ленточного типа фирмы Intermagnetics (США), которая впоследствии выпустила целую серию подобных соленоидов.

высокая по тем временам плотность критического тока в поле 10–15 Тл при температуре жидкого гелия. Активно исследовались сверхпроводящие свойства тройных халькогенидов молибдена, которые при температурах сверхпроводящего перехода  $\approx 14$  К обладали очень высокими значениями верхнего критического поля, существенно превышающими так называемый парамагнитный предел.

Исследования магнитных материалов, таких как бинарные и тройные соединения урана с элементами V и VI групп периодической системы, проводились в МЛ под руководством В. Тшебятовского в тесном контакте с возглавляемым им Институтом низких температур и структурных исследований ПАН. Эти исследования, включающие в себя измерения намагниченности в широком интервале температур и полей, а также измерения теплоёмкости и теплопроводности, были направлены на выяснение механизмов намагничивания, определения величины обменного взаимодействия, магнитной структуры и причин перехода одной магнитной фазы в другую. При выполнении этих работ у ряда соединений урана были обнаружены аномально большие поля магнитной анизотропии, порядка  $10^6$  Э. Столь сильная анизотропия объяснялась существованием анизотропного кристаллического поля, взаимодействие которого с ионом урана почти на порядок превышает обменное взаимодействие.

В гальваномагнитных исследованиях, которые в МЛ также выполнялись под непосредственным руководством Н.Е. Алексеевского, важное место занимало изучение электронных свойств различных металлов, прежде всего определение топологии поверхности Ферми и изучение такого явления, как магнитный пробой, при котором электроны в сильном магнитном поле туннелируют между отдельными частями поверхности Ферми. В проведённых в МЛ экспериментах по изучению магнетосопротивления в сильных магнитных полях было открыто существование магнитного пробоя у ниobia, ванадия, рутения и железа. Была продемонстрирована также возможность использования явления магнитного пробоя для практических целей. Так, в результате изучения гигантских магнитопробойных осцилляций магнетосопротивления бериллия был сконструирован бериллиевый датчик с чувствительностью к изменению магнитного поля  $5 \times 10^{-7}$  в интервале полей 7–8 Тл. Здесь следует отметить, что в те годы МЛ во Вроцлаве занимала в области изучения магнитного пробоя одно из ведущих мест в мире. И этому способствовало прежде всего наличие монокристаллов различных переходных металлов с рекордно высоким уровнем чистоты, приготовление которых стало возможным в результате тесного сотрудничества академий наук ГДР, Польши и СССР.

В уже упомянутой статье сборника [1], вышедшей в год 10-летия МЛ, отмечается: "Международная лаборатория за сравнительно короткий период своего существования превратилась в активно действующую международную организацию. В ней создан и успешно действует международный научный коллектив научных работников, которым выполнен ряд интересных исследований и получены важные практические результаты... В настоящее время с Международной лабораторией сотрудничают 2 института Болгарской академии наук, 3 — Академии наук ГДР, 3 — Польской академии наук, 10 — Академии наук СССР; их число непрерывно увеличивается...".

Дальнейшему интенсивному развитию работ МЛ в 1980-е годы в существенной мере помешала политическая обстановка в Польше, введение в стране в 1981 г. военного положения и, соответственно, тяжёлая экономическая ситуация в промышленности и науке. Но, несмотря на

экономические трудности, именно в эти годы идея существенной модернизации лаборатории, которая подразумевала прежде всего получение постоянного магнитного поля до 30 Тл и переход на тиристорные источники питания для биттеровских магнитов, начинает реализовываться. Н.Е. Алексеевский предпринимает героические усилия по добыванию денег, необходимых для этого проекта, и в середине 1980-х годов СССР выделяет для этой цели порядка 1 млн рублей. Заказ на разработку и постройку специально для МЛ во Вроцлаве тиристорных источников питания суммарной мощностью 30 МВт был размещён и успешно выполнен на предприятиях Эстонской ССР.

В первоначальном плане модернизации предполагалось расширение МЛ и постройка нового корпуса лаборатории на окраине Вроцлава вблизи реки Одра, с тем чтобы использовать воды реки для охлаждения биттеровских магнитов во вторичном контуре системы охлаждения. Предполагалось, что гибкая система управления питанием даст возможность проводить эксперименты параллельно на четырёх установках в поле 18 Тл или, при условии подключения всей энергии к одной установке, в поле до 30 Тл. Так планировал развитие МЛ Н.Е. Алексеевский. Но история распорядилась по-своему. Распад СССР и его политические и экономические последствия намного отодвинули во времени реализацию планов модернизации МЛ. Новый корпус лаборатории (рис. 1б) со смонтированным силовым тиристорным оборудованием был введён в строй только в конце 1990-х годов, через несколько лет после ухода Н.Е. Алексеевского из жизни. И построен он был не на берегу реки Одра, а рядом со старым зданием.

В начале 1990-х годов у Н.Е. Алексеевского возникают серьёзные проблемы со здоровьем и на фоне трагических для отечественной науки внешних событий в стране он практически отходит от дел. В апреле 1993 г., за полгода до своей кончины, Н.Е. Алексеевский передаёт полномочия председателя Совета МЛ А.С. Боровику-Романову. (Список председателей Совета МЛ и её директоров в разные годы её деятельности представлен в табл. 3.) А за месяц до этого экспертная группа, состоящая из учёных Российской и Польской академий наук, рассмотрела вопрос о дальнейшей судьбе МЛ, и основным итогом встречи экспертов явилось предложение о развитии в МЛ техники квазистационарных магнитных полей напряжённостью выше 40 Тл. Дело в том, что в новых условиях пореформенной Польши стали недоступными требуемые для регулярной работы биттеровских соленоидов электрические мощности, во-первых, из-за отсутствия необходимых ресурсов (отказ Вроцлавского отделения электроэнергии предоставить электроэнергию мощностью несколько мегаватт в дневное время, в результате чего МЛ перешла на ночной режим работы при проведении экспериментов на биттеровских магнитах) и, во-вторых, из-за очень высокой стоимости электроэнергии, что самым негативным образом сказалось на лабораторном бюд-

жете. Тогда было предложено использовать мощное тиристорное оборудование для работы в режиме длинного импульса, при котором требуемая электрическая мощность затрачивается в течение нескольких долей секунды [10].

Во второй половине 1990-х и начале 2000-х годов была проведена большая работа по реализации этой идеи и созданию в МЛ техники получения квазистационарных магнитных полей напряжённостью выше 40 Тл. Работа велась одновременно в нескольких направлениях. Во-первых, были выполнены расчёты электрических и механических свойств предполагаемых к изготовлению импульсных катушек. Во-вторых, необходимо было выбрать материал для различных секций импульсного соленоида. Это должен быть предельно прочный в механическом отношении композиционный сплав с требуемой величиной электрического удельного сопротивления. Работы по таким сплавам, а именно микрокомпозитам Cu–Nb, проводились в России во Всероссийском научно-исследовательском институте неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара. Этот уникальный материал имеет рекордно высокие прочностные характеристики ( $\sigma_b > 1000$  МПа) и высокую проводимость, порядка 75 % проводимости чистой меди. В-третьих, тиристорный источник питания, первоначально предназначавшийся для использования с биттеровскими магнитами в стационарном режиме, необходимо было значительно модернизировать для работы в режиме длинного импульса. На окончательную отладку системы управления питанием импульсных катушек и измерительного оборудования для исследования транспортных и оптических свойств образцов материалов ушло более двух лет.

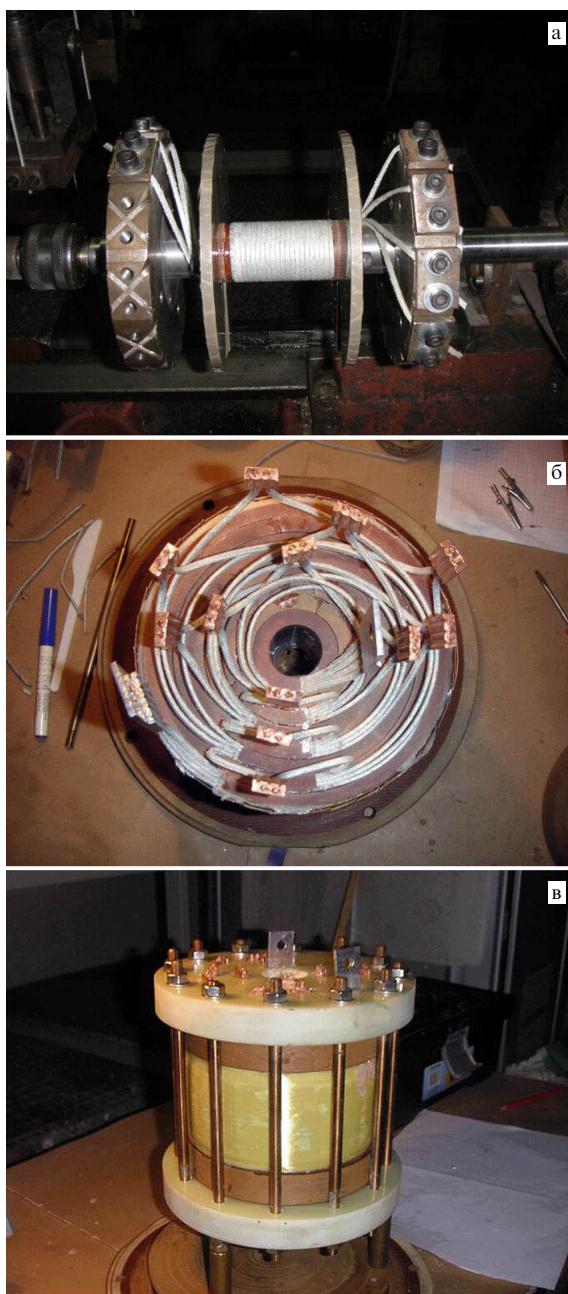
И наконец, большие усилия были затрачены на разработку и отладку технологии намотки импульсных магнитов, постройку оборудования, изготовление необходимой оснастки. Для согласования с параметрами тиристорного источника питания импульсные магниты (рис. 5) делались многосекционными с последовательно-параллельным соединением отдельных секций. Секционирование применялось и для уменьшения механических напряжений в магните — он состоял из двух или даже трёх катушек, вложенных одна в другую с небольшим радиальным зазором [11]. В результате магнит с рабочим отверстием 25 мм выдерживал более 200 импульсов амплитудой 30–38 Тл. На рисунке 6 импульсный магнит, создающий поле 48 Тл, с гелиевым криостатом и измерительной вставкой показан в рабочей обстановке в магнитном зале МЛ. В последнее время в МЛ изготовлен импульсный магнит с отверстием, увеличенным до 30 мм. После изготовления соответствующего криостата с  $\text{He}^3$  это позволит понизить температуру проведения экспериментов до 0,4 К с сохранением достаточно большого рабочего объёма.

Со времени начала функционирования МЛ во Вроцлаве прошло 44 года. Уже почти 20 лет, как с нами нет Н.Е. Алексеевского, но его любимое детище продолжает жить и развиваться. Интерес к проведению измерений в МЛ остаётся весьма высоким, и около 10 % поступающих заявок приходится отклонять из-за переполнения программы работ. Так, в 2011 г. эксперименты в МЛ проводились с участием 71 учёного (не считая польских учёных), из них 35 — граждане России из 15 институтов РАН и 5 университетов. В том же году были опубликованы 54 работы в периодических изданиях и 20 работ в трудах конференций.

Изменился состав членов МЛ. Полноправные (постоянные) члены лаборатории, вносящие членские взносы, — это Болгарская академия наук (5 %), Национальная

**Таблица 3.** Председатели Совета и директора Международной лаборатории в разные годы её деятельности

Председатель Совета МЛ	Директор МЛ
Н.Е. Алексеевский, 1968–1993 гг.	В. Тшебятовский, 1968–1982 гг.
А.С. Боровик-Романов, 1993–1997 гг.	Б. Сталинский, 1982–1993 гг.
А.Ф. Андреев, с 1997 г.	Я. Клямут, 1993–2012 гг.



**Рис. 5.** Изготовление импульсного магнита: (а) намотаны четыре из 32 слоёв, (б) опрессованы соединения между слоями и секциями. (в) Готовый магнит.

академия наук Украины (5 %), Польская академия наук (60 %) и РАН (30 %). В МЛ появились ассоциированные члены — научные организации из Англии (2), Молдавии (1) и Германии (1), которые оплачивают свои расходы на криогенные жидкости и электроэнергию. Их права в принятии решений о деятельности МЛ сильно ограничены. В настоящее время годовой бюджет МЛ немножко превышает 1 млн долларов.

"Самым важным достижением является коллективный труд... Сотрудничество помогает проводить наиболее актуальные исследования в области физики твёрдого тела... ибо наука в мире становится всё дороже, поэтому



**Рис. 6.** Импульсный магнит (48 Тл) с гелиевым криостатом и измерительной вставкой в магнитном зале МЛ. Магнит помещён в пластиковый криостат с жидким азотом.

работы надо вести коллективно". (Из ответа Н.Е. Алексеевского на вопрос журналиста местной газеты в связи с 20-летием МЛ о наиболее важном её достижении, Вроцлав, 1988 г.)

### Список литературы

1. Алексеевский Н Е, Красноперов Е П, в сб. *Многостороннее сотрудничество академий наук социалистических стран* (Под общ. ред. Г К Скрябина) (М.: Наука, 1978) с. 138
2. Базан Ч, в сб. *Портрет экспериментатора: Николай Евгеньевич Алексеевский* (Под общ. ред. М Н Михеевой) (М.: Academia, 1996) с. 112
3. Тройнар К, в сб. *Портрет экспериментатора: Николай Евгеньевич Алексеевский* (Под общ. ред. М Н Михеевой) (М.: Academia, 1996) с. 121
4. Powstanie Laboratorium, <http://www.ml.pan.wroc.pl/pl/historia/>
5. Тройнар К А, Базан Ч Э *ПТЭ* (3) 214 (1972)
6. Trojnar K *Acta Phys. Polonica A* **40** 821 (1972)
7. Bazan C, in *Fizyka i chemia ciala stałego Vol. 1* (Pod red. B Stalińskiego) (Wroclaw: Zaklad Narodowy im. Ossolińskich, 1977) p. 161
8. Khrustalev B P et al. *J. Phys. E Sci. Instrum.* **10** 140 (1977)
9. Schneider-Muntau H J, Rub P *The Helix Project, Colloques Intern. C.N.R.S., No. 242 Physique Sous Champs Intenses* (1974) p. 161
10. Nizhankovskii V I et al., in *Proc. of 14th Intern. Conf. on Magnet Technology, Helsinki, 1995*
11. Berezovetz V A et al., in *Megagauss-9. Proc. of Ninth Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Moscow-St. Petersburg, July 7–14, 2002* (Ed. V D Selemir, L N Plyashkevich) (Sarov: VNIIIEF, 2004) p. 90