

Московский Государственный Университет
Геологический факультет

Реферат

по истории и методологии геологических наук на тему

“История отечественной электроразведки”

Выполнил студент гр. 509
Пушкарёв П.Ю.

Москва 1997
Содержание.

1. Введение.	
2. Первые попытки изучения электрических процессов в Земле.	3
3. Роль А.А. Петровского в становлении Ленинградской школы.	5 7
4. Жизнь и деятельность В.Р. Бурсиана.	
5. Разработка теории электроразведки в работах В.Р. Бурсиана.	8
6. Предложение А.П. Краевым идеи частотного зондирования земной коры.	10
7. Изучение процессов вызванной поляризации С.М. Шейнманном.	11 13
8. А.И. Заборовский - основатель Московской школы.	
9. Первый учебник А.И. Заборовского по геофизическим методам.	15
10. Отражение тенденций развития в трудах А.И. Заборовского.	16
11. Вклад профессоров кафедры геофизики МГУ в дело науки и образования.	18
12. Математические методы, разработанные А.Н. Тихоновым и В.И. Дмитриевым.	20
13. Создание принципов применения магнитотеллурики М.Н. Бердичевским.	22
14. Современная теория М.Н. Бердичевского магнитотеллурики и других методов.	24 26
15. Достижения других московских ученых.	28
16. Основные работы Л.Л. Ваньяна.	30
17. Другие электроразведочные школы и направления.	31
18. Заключение.	33
19. Список использованной литературы.	

Что такое история отечественной электроразведки? Это история возникновения, существования и распада сильных научных школ. История жизни и творчества замечательных ученых. Гениальных открытий и жестоких разочарований.

Причина, побудившая меня обратиться к теме, связанной с этим направлением разведочной геофизики, естественна. В рамках электроразведки я работал над курсовой работой, работаю над дипломом, надеюсь работать и в дальнейшем.

Рассказывать об одном из великих ученых я не стал потому, что это уже сделали или сделают гораздо более авторитетные люди в отдельных брошюрах, журнальных статьях или вступительных статьях к собраниям работ этих ученых. Научные же школы, обычно существующие в университетах и различных институтах, как правило, публикуют обзоры своей деятельности, приуроченные к юбилеям или крупным конференциям. В то же время, мне не удалось найти ни одного достаточно полного описания истории всего направления в целом. Исторические очерки, включаемые в учебники и монографии, всегда очень коротки и бессвязны, а статьи, тезисы докладов и даже сами доклады авторитетных исследователей обычно посвящаются анализу современного состояния и перспективам развития электроразведки.

Поэтому в рамках работы над данным рефератом я, как говорят, “пользуясь случаем”, счел нужным попытаться сделать обзор истории развития всей отечественной электроразведки в целом. При этом мне способствовало то, что эта научно-прикладная дисциплина возникла уже в послереволюционные годы, и поэтому развивалась достаточно независимо от западной. Тем не менее, существовала и одна серьезная проблема. При чтении статей, посвященных достижениям основных электроразведочных школ, меня крайне удивило то, что все они в сущности были одинаковыми. Это создавало видимость того, что все ученые нашей страны упорно занимаются одним и тем же. Лишь более детальный анализ результатов исследований, проводимых в разных организациях, показывает, что, занимаясь общими проблемами, все эти организации подходят к их решению с разных сторон, уделяя свое внимание отдельным их аспектам. Поэтому их работы не повторяют, а дополняют друг друга. Поскольку детальный анализ, позволяющий увидеть эти различия, невозможен по обзорам деятельности, я, пользуясь полученными за годы обучения на кафедре геофизики знаниями, построил свою работу на самостоятельном изучении монографий и учебников разных авторов.

Обзор основных событий в истории электроразведки и результатов, полученных отдельными учеными и научными школами, приводимый в реферате, призван как разобраться в закономерностях развития науки на конкретном примере, так и помочь при работе по специальности.

Первые попытки изучения электрических процессов в Земле.

Говоря о земных электрических процессах в широком понимании (включая атмосферно-электрические явления), мы находим истоки учения об электричестве Земли в трудах великого русского ученого, основателя Московского университета М.В. Ломоносова. Так, в 1753 г. М.В. Ломоносов и Г.В. Рихман провели научные исследования электрических (грозовых) явлений в атмосфере.

Другим пионером изучения электрического поля Земли был американский просветитель, государственный деятель и ученый Бенджамин Франклин. Как

естествоиспытатель он известен в основном разработкой теории электричества. Его опыты по изучению атмосферного электричества относятся к 1747 - 1754 гг.

Что касается электрических процессов в земной коре, то мысль о них возникла только в начале прошлого века. Именно тогда авторитетным английским ученым Дэви, одним из основателей электрохимии, была выдвинута гипотеза, призванная объяснить природу магнитного поля Земли. Гипотеза Дэви полагала, что земное магнитное поле вызывается широтными токами, непрерывно циркулирующими в земной коре. Эта гипотеза не опиралась на какие-либо исследования, она была просто придуманной.

Развитие телеграфной и телефонной связи принудило с середины 19 века начать широкое систематическое изучение электрических процессов в земной коре. Помимо этого, научный и практический интерес к этим процессам возрос после мощной электромагнитной бури, имевшей место в 1859 г., обнаруженной всеми обсерваториями мира. Эта буря сопровождалась интенсивными полярными сияниями и земными электрическими токами, нарушившими работу многих линий связи. Попутно с наблюдениями магнитного поля Земли в целом ряде обсерваторий мира были организованы непрерывные наблюдения поля электрических токов в земной коре.

В области прикладной геоэлектрики - электроразведки первые полевые наблюдения были выполнены в 1830 г. Английский естествоиспытатель Р.В. Фокс обнаружил явление естественной поляризации в породах. Однако, он не связал существование естественного электрического поля с рудными залежами. Он полагал это поле универсальным, присущим всей Земле явлением. Рудные жилы рассматривались им лишь как коллекторы и проводники этого общего поля. Поэтому его исследования и дальнейшие попытки в этом направлении не имели последующего значения.

В конце прошлого века мысль об использовании электрических и электромагнитных эффектов для изучения Земли была высказана в России Петром Бахметьевым. Будучи народолюбом, он вынужден был скрываться от преследования царских ведомств и уехал в Болгарию, где стал профессором Софийского университета. Позднее он приезжал в Россию, где, в частности, выступал с первым научным сообщением о возможности использования электрических эффектов в геологических целях.

В 1903 г. в России вышла монография Е.И. Рагозина "О применении электричества к исследованию рудных залежей". К сожалению, ее основные идеи автор не смог внедрить в жизнь, поэтому данная работа в то время осталась практически не замечена.

Важнейшую роль в развитии прикладной электроразведки сыграли исследования, проведенные группой французских исследователей, возглавляемой ученым-физиком Конрадом Шлюмберже. В 1912 - 1914 гг. он создал и практически опробовал один из основных методов электроразведки - метод вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). Предложенная им методика полевых работ и интерпретации получаемых данных оказалась настолько простой и в то же время совершенной, что метод ВЭЗ в своем первоначальном виде применялся до 50-х гг. для структурных исследований, а в малоглубинном варианте он в несколько усовершенствованном виде используется до сих пор. Помимо этого, основные идеи, на которых до сих пор базируется теория интерпретации всех электромагнитных зондирований, были также впервые обоснованы и использованы К. Шлюмберже. В их число входит использование горизонтально - слоистой модели Земли, кривых кажущегося сопротивления, билогарифмических бланков для их отображения, палеток для интерпретации.

В группу ученых, работавших в рамках фирмы Шлюмберже, входил брат Конрада Марсель Шлюмберже, а также талантливый математик, автор переведенной на русский язык книги “Математические основы электрической разведки постоянным током” Майе и один из основных разработчиков теории интерпретации кривых ВЭЗ Мартэн.

Помимо ВЭЗ, фирмой Шлюмберже был разработан и опробован еще один метод постоянного тока - метод электрического профилирования (ЭП). В 1913 г. на месторождении Сен-Беле К. Шлюмберже впервые применил метод естественного поля (ЕП) в варианте, близком к современному. Им также была впервые высказана идея использования вызванной поляризации руд с геологическими целями, на основе которой позднее был создан метод вызванной поляризации (ВП). А первые успешные работы с использованием переменного тока были проведены Зундбергом и Лундбергом в Швеции в 1918 г.

В 1923 г. фирма Шлюмберже организовала крупные по масштабам того времени электроразведочные работы по изучению нефтеносных структур в Румынии. Здесь с ними работал выдающийся румынский геофизик Стефанеску, проживший долгую жизнь, полностью посвященную электроразведке. Его работы оказали огромное влияние на развитие нашей отечественной электроразведки.

В 30-х гг. фирма начала работы в СССР. В 1934-м г. с ней был заключен контракт, и вся группа ученых во главе с К. Шлюмберже переехала в Россию. Многие наши студенты и молодые ученые, будущие великие профессора, работали бок о бок с ними, поэтому можно сказать, что роль французской электроразведки в становлении отечественной оказалось весьма значительной.

В 1937-м г. сотрудники фирмы были обвинены в шпионаже. Тех, кто обладал французским гражданством, выслали из страны, остальных арестовали. Через несколько дней после возвращения во Францию у К. Шлюмберже случился инфаркт, и он умер.

Роль А.А. Петровского в становлении Ленинградской школы.

Появление электроразведки в СССР во многом обязано трудам профессоров Ленинградского университета, в первую очередь А.А. Петровского. Он пришел в геофизику в 20-х гг. уже будучи известным физиком и наиболее крупным радиотехником того времени. Под его руководством к 1924 г. независимо от фирмы Шлюмберже, чьи работы не публиковались, была разработана теория, методика и аппаратура метода ЕП. А.А. Петровский также занимался развитием и внедрением методов постоянного тока (ВЭЗ, ЭП) и ондометрии (так раньше назывались методы высокочастотного переменного тока). Им были проведены работы по опробованию этих методов в полевых условиях. В частности, под руководством А.А. Петровского и В.Р. Бурсиана в 1924 и 1925 гг. были выполнены съемки методом ЕП и методом эквипотенциальных линий, основанном на картировании линий равного потенциала электрического поля, на рудных месторождениях Алтая, Урала, Казахстана и в других районах. Наконец, именно он первым изучал возможности трансформаций кривых ВЭЗ, используемых для наглядного представления результатов и качественной интерпретации зондирований. Теоретические работы А.А. Петровского и его учеников по методам ЕП, ВЭЗ, ЭП и ондометрии продолжительное время являлись руководящими для наших геофизиков.

В 1932 г. вышел в свет учебник профессоров ЛГУ А.А. Петровского и Л.Я. Нестерова “Электроразведка постоянным током” - первый учебник по электроразведке [1]. В нем авторы указали на необходимость скорейшего внедрения геофизики на всех стадиях геологоразведочного процесса как быстро развивающейся, удешевляющей и ускоряющей горные работы отрасли. То, что геофизические работы воспринимались как экзотика, подтверждается их взглядом на желательную стадийность работ. Первом этапом было выделено геологическое картирование, вторым - сбор образцов и изучение их физических свойств, третьим - топосъемка. На основании этого предполагалось выбирать рациональный геофизический метод или набор методов.

Уже в рассматриваемом учебнике А.А. Петровский и Л.Я. Нестеров указали на необходимость того, чтобы геофизик был геологом и умел отметить негеологические результаты интерпретации, что остается актуальным до сих пор. Такое умение позволяет уменьшить неоднозначность обратной задачи геофизики и, следовательно, повысить надежность интерпретации.

Приведенная в учебнике классификация методов электроразведки выглядит следующим образом :



Хотя набор упомянутых здесь методов существенно вырос и изменился, принцип объединения методов в группы по используемым в них частотам используемого тока применяется до сих пор.

Далее в работе авторы впервые систематично и подробно рассматривают природу и основные закономерности структуры локальных естественных полей. Как наиболее простая и имеющая широкое практическое применение при поиске рудных месторождений рассматривается задача о поле естественно поляризованной сферы в однородной среде и в однородном полупространстве. Проводится расчет элементов залегания рудного тела, аппроксимируемого сферой, по данным площадных съемок и профилирования. Помимо этого, рассматриваются чисто практические вопросы, связанные с применением метода ЕП : устройство неполяризующихся электродов, применяемая аппаратура, методика полевых работ, принципы и методология интерпретации ЕП, примеры применения метода. Таким образом, практически учебник “Электроразведка постоянным током” является первой в целой серии книг различных

авторов, каждая из которых содержит достаточно полное и всестороннее описание одного из методов электроразведки.

Помимо метода ЕП, А.А. Петровский и Л.Я. Нестеров рассматривают и группу методов сопротивлений, в которую принято объединять методы, использующие постоянные искусственные поля - методы ВЭЗ, ЭП и каротажа на постоянном токе, приводя описание их аппаратуры, методики и принципов применения. Но теория методов сопротивлений практически не рассматривается, что, по словам авторов, обусловлено тем, что она еще плохо разработана.

Наряду с разработкой теории и подготовкой новых специалистов, сотрудники ЛГУ, как уже отмечалось, работали над внедрением новых методов, участвуя в научном руководстве полевыми работами.

В начале 30-х гг. ленинградские геофизические организации начали проводить широкие геофизические исследования с применением методов электроразведки постоянным током при решении задач геологоструктурного характера на различных объектах.

Посредством электрических методов решались геологоструктурные задачи в связи с поисками угля (Донбасс, Дальний Восток) и газовых месторождений (Дагестан, Саратов). Заслуживают упоминания первые работы на реках Иртыше (1931 г.), Волге, Енисее (1932 г.) в связи с изучением оснований под плотины гидростанций. Позже были разработаны новые и значительно усовершенствованы старые методы постоянного тока применительно к рудным объектам.

Что же касается судьбы метода ЕП, разработанного в СССР А.А. Петровским, то дальнейшее его развитие и совершенствование осуществлялось учеником А.А. Петровского профессором ЛГУ А.С. Семеновым. Основные результаты своих работ А.С. Семенов привел, в частности, в вышедшей в 1968 г. книге “Электроразведка методом естественного электрического поля” [2].

В ней, в отличие от вышеупомянутой работы А.А. Петровского и Л.Я. Нестерова, подробно и детально рассмотрены природа, условия образования и минералообразующее действие рудных естественных электрических полей. Кроме того, на высоком уровне описана теория метода - решены задачи о поле сферы, вертикальной столбообразной залежи, цилиндра, пластообразной залежи и комплекса проводников в однородных и простейших неоднородных средах.

Принципы использования метода описаны применительно как к решению задач поиска и разведки рудных месторождений, так и к решению задач геологического картирования, инженерно-геологических и гидрогеологических задач.

Жизнь и деятельность В.Р. Бурсиана.

Помимо А.А. Петровского, к числу основателей Ленинградской электроразведочной школы следует отнести профессора ЛГУ Виктора Робертовича Бурсиана. Причем его роль в развитии электроразведки как прикладной науки особенно велика. Помимо создания и опробования новых методов, руководства полевыми работами и организации учебного процесса, он, будучи талантливым и авторитетным ученым-физиком, разработал математические основы теории электроразведки с использованием искусственных полей. Ему удалось столь успешно определить круг задач, подлежащих рассмотрению, предложить пути их решения и систематизировать полученные результаты, что его работы по теории электроразведки выдержали

испытание временем, на много лет вперед определив направления ее дальнейшего развития и оставаясь актуальными до наших дней.

Справедливости ради следует отметить, что многие работы В.Р. Бурсиана выполнены им совместно с двумя другими известнейшими физиками, профессорами В.К. Фредериксом и В.А. Фоком. Однако, если деятельность этих ученых была связана с различными областями применения физики, то В.Р. Бурсиану следует поставить в заслугу то, что он посвятил электроразведке подавляющую часть своих трудов.

В.Р. Бурсиан родился в Петербурге в 1886 г. В 1904 г. он поступил на физико-математический факультет Петербургского университета. Окончив университет в 1910 г., он был оставлен при кафедре физики. До 1919 г. В.Р. Бурсиан преподавал физику в Политехническом институте. В 1919 г. он начал преподавать в Петроградском университете, где был избран на должность доцента по теоретической физике. Одновременно он был избран на кафедру теоретической физики физико-математического факультета Политехнического института. В 1918 г. при основании академиком А.Ф. Иоффе Физико-технического института В.Р. Бурсиан занял в нем должность ученого секретаря, а затем был назначен руководителем теоретического отдела этого института. В этих должностях он проработал в Физико-техническом институте им. Иоффе до 1932 г.

С 1932 г. В.Р. Бурсиан работал профессором и заведующим кафедрой теоретической физики Ленинградского университета. В 1933 г. при основании научно-исследовательского физического института (НИФИ) при ЛГУ он был назначен на должность заместителя директора НИФИ по научно-исследовательской части, с 1934 г. стал директором этого института. Параллельно с работой в НИФИ при ЛГУ В.Р. Бурсиан продолжал преподавать в университете теоретическую физику и с 1933 г. занял место декана физического факультета ЛГУ. В 1934 г. ему была присвоена ученая степень доктора физико-математических наук.

С 1924 г. В.Р. Бурсиан принимал активное участие в геофизических работах сначала в Геолкоме, а затем в геофизическом институте, ЦНИГРИ и нефтяном геологоразведочном институте.

В 1923-1924 гг. в Ленинграде были созданы две первых геофизических организации - институт прикладной геофизики и геофизическая секция при Геолкоме, в которую вошел и в короткий срок организовал геофизический отдел В.Р. Бурсиан. В отделе велась разработка теории электроразведки, разрабатывалась аппаратура, велись полевые работы.

Параллельно под его руководством велись теоретические и экспериментальные работы в лаборатории электрометрии НИФИ. В работе геофизической секции и лаборатории электрометрии также принимали участие В.А. Фок и В.К. Фредерикс.

Первые пять - шесть лет основное внимание уделялось разработке методов переменного тока - "эквипотенциальных линий", "интенсивности" и "индукции". Как уже говорилось, с 1924 г. электроразведочные партии, руководимые В.Р. Бурсианом и А.А. Петровским, успешно применяли метод эквипотенциальных линий на Урале, Рудном Алтае, в Казахстане и других районах. С 1926 г. метод интенсивности стал применяться в качестве ведущего метода переменного тока в рудной электроразведке. В 1929 г. Бурсиан и Фредерикс привлекли к сотрудничеству с Геолкомом Физико-технический институт, в котором в 1929 - 1930 гг. была разработана первая типовая отечественная геофизическая аппаратура - приемные рамки и ламповые вольтметры для метода интенсивности. В начале 30-х гг. вступил в строй метод индукции, разработанный под руководством В.Р. Бурсиана.

В 1929 г. была организована специальность электроразведки при кафедре геофизики на физическом факультете ЛГУ. Ее организатором и руководителем был В.Р. Бурсиан.

Основными предметами исследований В.Р. Бурсиана в начале 30-х гг. стали методы постоянного тока. Занимаясь в основном теорией, он одновременно руководил методическими и полевыми работами. Так в 1931 г. он был научным руководителем комплексной экспедиции по поиску медноколчеданных месторождений на Урале, а в 1932 г. при его участии были проведены работы на угольных месторождениях Кузбасса.

Разработка теории электроразведки в работах В.Р. Бурсиана.

В 1933 г. вышла первая часть монографии В.Р. Бурсиана “Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке”, посвященная теории электроразведки постоянным током и ставшая первым фундаментальным трудом по электроразведке [3].

Структура книги стала типичной для большинства учебников по электроразведке, выпущенных разными авторами позднее. В ней приводится система основных дифференциальных уравнений теории электромагнетизма - уравнения Максвелла и необходимые для их решения граничные условия. Затем эти уравнения рассматриваются для случая наличия только постоянных токов и осуществляется переход от векторного электрического поля к его скалярному потенциалу. Рассматривается основное для теории постоянного тока уравнение Лапласа для потенциала и граничные условия, позволяющие найти его решение. Затем в книге рассматривается ставший классикой вопрос об аналогии между электростатикой и постоянным током, подробно рассматривается теория заземлений и структура поля точечных и линейных электродов в однородном полупространстве, приводится формулировка принципа взаимности.

Далее впервые в отечественной литературе систематизированно рассматривается поле постоянного тока над основными моделями неоднородных сред. Анализируется структура поля над телами, аппроксимированными сферой и пластиной. Приводится задача о профилировании над вертикальным контактом, решаемая методом отражений и задача о профилировании над двумя вертикальными контактами (жилой, контактной зоной), решаемая методом многократных отражений. Автор также подробно описывает строгое решение прямой задачи ВЭЗ для двухслойного разреза, анализирует многослойные кривые ВЭЗ. Впервые приводится решение актуальнейшей задача о точечном источнике над однородным анизотропным полупространством.

Главной темой первых теоретических работ в области методов переменного тока, выполненных в основном В.Р. Бурсианом и В.А. Фоком, были задачи определения полей различных типов источников для простейших моделей сред - однородной среды и однородного полупространства. Основные результаты этих работ были изложены во второй части монографии В.Р. Бурсиана “Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке”, состоящей из двух томов.

Первый том второй части вышел в 1936 г. очень ограниченным тиражом. В нем были изложены основы теории переменных электромагнитных полей в проводящих средах и подробно рассмотрены следующие вопросы :

1. Структура гармонического, т.е. периодически меняющегося во времени поля. Для упрощения задачи о расчете гармонического поля было предложено использовать электродинамические потенциалы.
2. Структура плоского поля - частного случая гармонического, меняющегося в пространстве лишь в одном направлении. В природе плоскими можно считать поле, существующее в точке пространства, значительно удаленной от источника.
3. Задача определения гармонического поля бесконечно длинного кабеля с переменным током в однородной среде и над однородным полупространством.
4. Задача определения гармонического поля точечного диполя в однородной среде.

Через год был сдан в печать второй том второй части монографии В.Р. Бурсиана по теории переменных полей. Известно, что в нем, в частности, рассматривалась важнейшая задача определения гармонического поля заземленного кабеля над однородным полупространством.

К сожалению, В.Р. Бурсиан, В.А. Фок и В.К. Фредерикс по национальности были немцами, из-за чего в 1937 г. они были арестованы. Спасти В.А. Фока, вступившись за него, сумел известный ученый-физик П.Л. Капица, в будущем академик, лауреат Нобелевской премии. В.Р. Бурсиан через несколько лет умер в лагерях. Первый том его книги, посвященной переменным полям, был изъят из библиотек и уничтожен, поэтому сохранилось очень небольшое число экземпляров. Второй том был уничтожен на типографском уровне.

Работы В.Р. Бурсиана имели столь важное значение, что в 1972 г. в Ленинграде его учениками и учениками его учеников было выпущено в свет второе издание его монографии “Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке” [4]. Причем первая часть книги, посвященная постоянным полям, была почти не изменена, если не считать допущенных опечаток и неточностей, в основном отмеченных самим В.Р. Бурсианом в авторском экземпляре. Во вторую часть, посвященную переменному току, были внесены более существенные дополнения и исправления.

В 1937-1945 гг. электромагнитные методы и их теория развивались медленнее. Интерес, возникший к ним между 1924 и 1937 гг., был вызван первыми попытками применить переменный ток для поисков рудных месторождений. Стало ясно, что нестационарные электромагнитные поля в Земле имеют сложное строение и требуют специального изучения.

Предложение А.П. Краевым идеи частотного зондирования земной коры.

Деятельность ученых Ленинградского университета в предвоенные и послевоенные годы была направлена на разработку и внедрение новых методов исследования, а также на изучение физических свойств горных пород.

Следует упомянуть экспедицию в северные районы по опробованию метода индукции на различных частотах, экспедицию в Эльбрусский район по исследованию электрических локальных полей горных рек, горного рельефа и зоны вечных снегов, постановку первого в мире электроразведочного зондирования в зоне вечных снегов с целью определения мощности ледникового покрова, разработку совместно с институтом ВИРГ аппаратуры и элементов теории высокочастотных методов исследования поверхностного слоя земной коры.

Однако с современной точки зрения гораздо более важное значение имели начатые в предвоенные годы в лаборатории электрометрии кафедры физики земной коры ЛГУ исследования, проводимые под руководством ученика В.Р. Бурсиана, выдающегося геофизика Александра Павловича Краева. Эти исследования были

направлены на разработку теории низкочастотного метода электромагнитного глубинного зондирования земной коры. Результатом этой работы стало рождение одного из важнейших современных методов электроразведки - электромагнитного частотного зондирования (ЧЗ). Докторская диссертация А.П. Краева "Электромагнитное частотное зондирование слоистого массива", обобщившая полученные материалы, была защищена им в 1941 г. в блокадном Ленинграде. Война не позволила сразу же воплотить эти идеи в жизнь, и лишь в 1946 г. геоэлектрики ленинградского университета с участием сотрудников ВИРГа осуществили первое в мире частотное зондирование земной коры. Теория метода ЧЗ была доработана и сформулирована в современном виде московским ученым академиком А.Н. Тихоновым.

К сожалению, жизнь талантливого ученого А.П. Краева оказалась сложной и слишком короткой - он умер от инфаркта в 1952 г. В последние годы жизни он работал над созданием двухтомной монографии "Основы геоэлектрики". Ее первое издание должно было состоять из книги "Естественные и постоянные активные поля в Земле", вышедшей в 1951 г. и книги "Волновая геоэлектрика", написать которую А.П. Краев не успел. Однако в 1965 г. вышло второе издание "Основ геоэлектрики", составленное его учениками и коллегами по ЛГУ на основе первой книги, лекций, которые он читал в ЛГУ, и материалов его докторской диссертации [5].

Пожалуй, среди всех работ Ленинградских ученых, посвященных теории электроразведки и анализу физических свойств горных пород, по своей ценности эта книга может сравниться лишь с вышеупомянутой монографией В.Р. Бурсиана. В ней удивительно полно и связно описаны основы теории электромагнитного поля, включая закон сохранения количества электричества, закон сохранения энергии, особенности квазистационарного приближения, характеризующегося отсутствием высокочастотных переменных токов, особенности стационарного приближения, характеризующегося отсутствием всех переменных токов, особенности статического приближения, характеризующегося отсутствием любых токов.

А.П. Краевым были детально рассмотрены электрические свойства горных пород. При этом им были учтены такие важные факторы, как анизотропия и неоднородности. Он одним из первых показал, что в электроразведке только малую часть пород можно рассматривать как однокомпонентную, большинство - как двухкомпонентные среды. Помимо удельного электрического сопротивления (УЭС) пород им была рассмотрена их диэлектрическая проницаемость, ее определяющая зависимость от влажности и зависимость от минерального состава. Большое внимание автор уделил частотной дисперсии УЭС и диэлектрической проницаемости, а также их физической природе, описал основные полевые и лабораторные методы измерения этих свойств. Наконец, А.П. Краев детально рассмотрел электрические свойства отдельных оболочек Земли (различных слоев атмосферы, гидросферы, земной коры и верхней мантии).

Большое внимание А.П. Краев уделил методам постоянного тока. Он привел решение важнейших задач, связанных с применением методов постоянного тока в неоднородных средах, в том числе задачи о структуре магнитного поля петли над двухслойной средой и задачи о распределении поля электрического диполя над куполом или антиклиналью. Достаточно широк и круг рассмотренных задач о распределении поля на поверхности полупространства, содержащего аппроксимации рудных тел - поле простых и поляризованных зарядов шара, цилиндра и эллипсоида. Отдельно описано поле точечного источника и поле вертикального электрического диполя над анизотропной средой, методика определения параметров анизотропной среды (этот раздел переработан и дополнен А.С. Семеновым и А.В. Вешевым).

Часть книги, посвященная особенностям использования переменных полей, доработана и значительно дополнена Л.Б. Гасаненко. В ней много внимания уделено особенностям использования переменных полей, связанных с появлением частотной дисперсии УЭС, влиянием диэлектрической проницаемости среды. Здесь также приводятся решения важных практических задач теории переменных полей. Это задача о поле заземленного кабеля конечной длины и произвольной формы над двухслойной средой, задача о поле электрического и магнитного диполей в скважине и задача о поле вертикального и горизонтального магнитного диполей над горизонтально-слоистой средой.

Изучение процессов вызванной поляризации С.М. Шейнманном.

Основной вклад А.П. Краева в отечественную науку состоит в разработке им метода ЧЗ. В послевоенные годы были начаты работы по разработке теории аналогичного метода, в котором глубинность достигалась не уменьшением частоты поля, а увеличением времени его становления после мгновенного включения или, напротив, выключения постоянного тока. Такой метод получил название метода зондирования становлением поля (ЗС). Его разработка велась почти параллельно А.Н. Тихоновым в Москве и С.М. Шейнманном в Ленинграде.

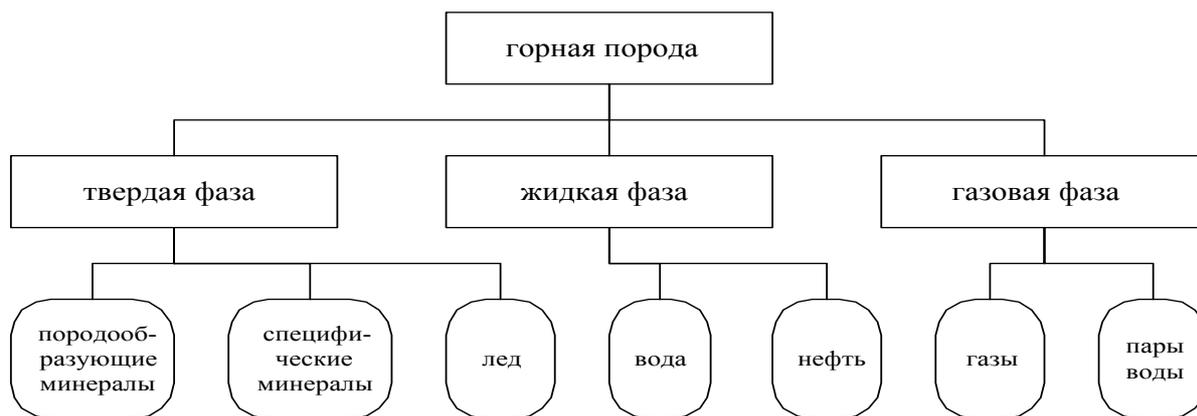
С.М. Шейнманн, как и А.П. Краев, был учеником В.Р. Бурсиана. Его судьба также была трудной - несколько лет он, как и его учитель, провел в лагерях и тюрьмах. Тем не менее, он сыграл важную роль в развитии геофизики, занимаясь в разное время проблемами почти из всех известных областей электроразведки - например, разработкой теории метода ЗС.

Но отдельно хотелось бы остановиться на работах С.М. Шейнманна, посвященных изучению физических основ еще одного важнейшего электроразведочного метода - метода ВП. Он занимался этой проблемой в течение многих лет, опубликовав ее важнейшие результаты в монографии "Современные физические основы теории электроразведки", вышедшей в 1969 г [6].

К тому времени практика электроразведки значительно опережала теорию. Использовалась электродинамическая модель среды, в то время как реальная горная порода представляла собой многофазную среду с большим числом свойств, многие из которых уже использовались при поиске и разведке полезных ископаемых методом ВП. Теории этого метода было посвящено достаточно много работ, однако отдельные ее части не образовывали единого целого. Восполнению этого пробела и была посвящена книга С.М. Шейнманна.

По словам автора, теоретическая основа любого метода состоит из двух частей - физической и интерпретационной. Теория большинства методов (ВЭС, ЧЗ, ЗС) просто представляет собой совокупность специально подобранных частных задач электродинамики, и в их теории доминирует интерпретационная часть. Физических же основ метода ВП пока не было сформулировано, а интерпретационная часть, подтвержденная практикой, существовала. Это создало обманчивую видимость готовности теории в целом.

Как известно, состав реальной горной породы можно представить в следующем виде :



С.М. Шейнманн рассмотрел упрощенную двухфазную модель горной породы, состоящую из твердой и жидкой фаз. Твердая фаза в этой модели представлена как непроводящим минеральным скелетом, так и проводящими включениями, объем которых невелик, но которые обычно и представляют собой основной объект поисков. Жидкая фаза представлена заполняющей поры водой с растворенными в ней солями. С точки зрения электроразведки лед, нефть, газы и пары воды могут быть также отнесены к твердой фазе, поскольку обладают высоким сопротивлением. Такая модель хорошо с точки зрения электромагнитных свойств среды аппроксимирует реальную породу и существенно упрощает все расчеты.

В “современных физических основах теории электроразведки” автор в отличие от других исследователей при рассмотрении уравнений Максвелла учел токи диффузии, возникающие при движении ионов из участков с повышенной концентрацией в участки с пониженной концентрацией. Он также сформулировал граничные условия для этой расширенной системы уравнений электромагнитного поля. Эти граничные условия отличаются от классических, являясь более общим случаем, включающим их как частный.

С учетом токов диффузии С.М. Шейнманн рассмотрел задачу об электромагнитном поле вблизи плоской границы сред и задачу о сферическом теле в однородном растворе. Их решение позволило построить модель явлений во вкрапленных рудах. Наконец, он изучил переменные гармонические и устанавливающиеся поля в двухфазных средах на модели с непроводящей твердой фазой и модели, содержащей электронные проводящие включения. Важным результатом, полученным С.М. Шейнманном, явилось также выявление наличия обратной зависимости между поляризацией рудного тела и удельным электрическим сопротивлением вмещающей породы.

Основным недостатком теории, созданной С.М. Шейнманном, оказалась ее чрезмерная сложность. Менее наукоемкую, но зато более простую для практического использования теорию удалось сформулировать другому известному Ленинградскому геофизику В.А. Комарову.

В.А. Комаров много работал в области совершенствования и внедрения метода ВП для поисков руд и других задач. Им, в частности, была написана выдержавшая два издания (1972 и 1980 гг.) книга “Электроразведка методом вызванной поляризации” [7]. В ней автор изложил основные теоретические и экспериментальные данные о природе вызванной поляризации горных пород и руд, привел теоретические расчеты и результаты моделирования полей вызванной поляризации, описал методику и технику полевых работ, а также принципы истолкования аномалий ВП.

В основном именно благодаря работам Ленинградских геофизиков метод ВП стал широко и успешно применяться в рудной электроразведке. Позднее метод стал использоваться для решения гидрогеологических и экологических задач, а также, в специальных модификациях, для косвенных поисков нефти.

А.И. Заборовский - основатель Московской школы.

Александр Игнатьевич Заборовский по праву считается основателем Московской геофизической школы. Ему принадлежит ведущая роль как в создании научных основ электроразведки и внедрении электроразведочных методов в производство, так и в построении системы геофизического образования и воспитании целой плеяды выдающихся ученых-геофизиков.

А.И. Заборовский родился в 1894 г. в селе Городец Петербургской губернии. После окончания гимназии он поступил на физико-математический факультет Петербургского университета, где учился с 1913 по 1917 гг., а затем работал магнитологом в Павловской магнитной обсерватории и Компасной части Главного гидрографического управления Морского министерства.

В 1919 г. А.И. Заборовский был командирован в качестве руководителя магнитометрических работ на съемку Курской магнитной аномалии (КМА), затем эти исследования до 1926 г. проводил от Особой комиссии по исследованию КМА (ОККМА). Магнитные съемки этого района были практически первыми в мире государственными геофизическими съемками и началом геофизической службы страны. В результате работ ОККМА при участии таких выдающихся ученых как А.Д. Архангельский, И.М. Губкин, П.П. Лазарев, О.Ю. Шмидт и др. были получены важнейшие научные и практические результаты.

В 1920 г. А.И. Заборовским была опубликована статья “О методах магнитных измерений, применявшихся летом 1919 г. в техническом отряде по исследованию КМА”, являющаяся фактически первой научной публикацией по разведочной геофизике, отвечающей современному уровню теории магниторазведки. В 1923 - 1925 гг. в соавторстве с академиком П.П. Лазаревым он опубликовал крупные работы, посвященные выяснению причин КМА и теории интерпретации результатов магниторазведки.

В монографии “Земной магнетизм”, вышедшей в 1929 г., а также в последующих статьях А.И. Заборовский развил теорию земного магнетизма, проанализировал природу постоянной и переменных составляющих элементов земного магнитного поля, рассмотрел фундаментальные задачи теории геопотенциальных полей, создав тем самым основы теории магниторазведки.

Большой вклад внес А.И. Заборовский и в создание ряда других методов разведочной геофизики. Так, в 1926 г. он обосновал сейсмический метод преломленных волн, а в 1927 г. опробовал его при исследовании ложа водохранилища на Алтае. В военные годы А.И. Заборовский работал над созданием и развитием радиометрических методов поиска урана.

Но все же основная часть работ А.И. Заборовского посвящена электроразведке. Особую ценность представляют его книги: “Электроразведка” (1943 и 1963 гг.), “Переменные электромагнитные поля в электроразведке” (1960 г.) и многие статьи, которые составляют фундамент современной теории электроразведки. Можно с полным правом считать его одним из первых в стране профессиональных электроразведчиков.

Летом 1929 г. А.И. Заборовский выполнил электроразведочные работы методом сопротивлений в районе Грозного с целью поиска и исследования нефтеносных структур. Эти работы выполнялись параллельно с работами фирмы Шлюмберже и были настолько успешными, что фирма была вынуждена признать, что ее секреты практически перестали быть таковыми.

В 1945 г. по инициативе А.И. Заборовского в МГРИ были начаты работы в области индуктивных методов электроразведки. Эти работы определили новый подход к развитию теоретических и методических основ низкочастотных индуктивных методов. Впоследствии эти работы привели к созданию нового метода рудной электроразведки - метода переходных процессов (МПП), который в настоящее время является основным методом рудной электроразведки, использующим переменный ток. В 1954 г. при поддержке А.И. Заборовского во МГРИ были начаты работы в области высокочастотных методов, в основном радиоволнового просвечивания.

Наряду с активной научной деятельностью А.И. Заборовский занялся подготовкой кадров специалистов-геофизиков. Так в 1923 г. он прочитал курс магниторазведки, а в 1924 г. - курс геофизических методов разведки в Московской горной академии (МГА). Это были первые в СССР курсы разведочной геофизики.

Подготовка специалистов-геофизиков в МГУ была начата на физико-математическом факультете, где с 1927 г. А.И. Заборовский читал лекции по разведочной геофизике, а с 1928 г. - по магниторазведке и электроразведке.

В 1930 году подготовка геофизиков-разведчиков была передана во вновь организованной Московский геологоразведочный институт (МГРИ), сформированный на базе геологоразведочного факультета МГА и геолого-почвенного факультета МГУ. А.И. Заборовский создал кафедру геофизики МГРИ, которой руководил с 1930 по 1954 г., а позднее - геофизический факультет МГРИ, деканом которого он являлся с 1942 по 1945 г.

В 1944 г. в связи с острой потребностью в геофизиках на геолого-почвенном факультете МГУ была открыта кафедра геофизики. Структура учебного плана, составленного организатором и первым заведующим кафедрой А.И. Заборовским, стала в дальнейшем основой аналогичных планов в вузах страны. Руководя кафедрой в 1944-1949 гг. и 1955-1968 гг., а затем работая профессором (с 1968 по 1976 гг.) А.И. Заборовский основал современную школу геофизиков МГУ.

Первый учебник А.И. Заборовского по геофизическим методам.

Основные работы А.И. Заборовского, являясь, с одной стороны, учебниками для студентов геофизических специальностей, одновременно могут рассматриваться и как научные монографии, поскольку включают в себя достаточно полное описание теории и практики электроразведки в том виде, в котором они существовали к моменту выхода книг, а некоторые результаты и вовсе приводятся в его работах впервые.

А.И. Заборовский является автором первого учебника по основным методам разведочной геофизики. Учебник назывался "Геофизические методы разведки" и вышел в свет еще в 1932 г [8]. В нем, в частности, было высказано несколько интересных идей, на которых хотелось бы остановиться подробнее.

Причины быстрого развития геофизики автор видел в том, что поскольку ранее поиск и разведка осуществлялись геологией, оперирующей с непосредственно доступными объектами, то месторождений с явно выраженными наружными признаками стало очень мало. Стоимость геологоразведочных работ и добычи начала

расти, поэтому стало необходимо быстрое и активное внедрение геофизических методов. Кстати говоря, аналогичная ситуация наблюдается и сейчас. Все месторождения, ярко проявляющие себя в геофизических полях, как правило, уже найдены. Встает вопрос о поиске и разведке менее богатых месторождений в более сложных геологических условиях. Это требует, с одной стороны, совершенствования существующих и создания новых геофизических методов, а с другой, широкого внедрения комплексирования методов, в том числе электроразведочных, в геофизическую практику. В использовании идеологии комплексирования геофизических методов и разумном геологическом истолковании геофизических результатов А.И. Заборовский видел два основных пути сужения неоднозначности решения обратной задачи.

Очень интересны способы классификации геофизических методов, предложенные в учебнике А.И. Заборовского. По природе изучаемого поля он выделил две группы методов - первую, в которой мы имеем дело с полями, обязанными своим существованием изучаемому объекту, и вторую, в которой мы имеем дело с полями, созданными нами, кем-то или чем-то еще, структура которых меняется в зависимости от свойств изучаемого объекта. В соответствии с этой классификацией в первую группу следует отнести гравиразведку, магниторазведку, метод ЕП, ядерную геофизику с естественными источниками. Во вторую группу можно включить сейсморазведку, ядерную геофизику с искусственными источниками и, все электромагнитные зондирования, в том числе и метод магнитотеллурических зондирований. В традиционной же классификации, основанной на разделении методов по природе изучаемых полей, он попадает в группу методов естественных полей, отделяясь от всех других электромагнитных зондирований, попадающих в группу искусственных полей, что не очень логично.

А.И. Заборовский также предложил делить методы на группу, включающую методы, в основе которых лежат явления, основанные на непосредственных свойствах объектов, и группу, включающую методы, в основе которых лежат явления, основанные на их косвенных свойствах. В такой классификации, например, метод ВП в рудной модификации следует отнести к первой группе, а в нефтяной - уже ко второй.

К электроразведочным методам постоянного тока он отнес те, в которых используется либо естественное, либо создаваемое питающей линией поле и выделил среди них методы ВЭЗ, ЭП и эквипотенциальных линий. Для измерения слабых сигналов в этих методах он указал на необходимость использования керамических неполяризующихся электродов. Далее автор отметил, что использование переменного тока позволяет отказаться от использования неполяризующихся электродов при измерении электрического поля, и что существует возможность измерения магнитного поля с помощью катушки или рамки, а также рамочного возбуждения переменного электромагнитного поля. Интересно, что в работе еще не упомянута возможность проведения зондирования методом переменного тока.

Высокочастотные методы А.И. Заборовский называл радиотехническими и по идеологии отождествлял скорее не с электроразведочными, а с сейсмическими. Он выделил несколько разновидностей этих методов :

1. Теневой метод, позволяющий определить геометрию рудного тела, расположенного между скважинами (в дальнейшем была создана строгая теория и принципы применения этого метода, сейчас носящего название метода радиоволнового просвечивания).
2. Лучевой метод, основанный на отражении радиоволн от границ (этот метод в дальнейшем получил широчайшее развитие, но уже с использованием упругих волн, переродившись в основной метод сейсморазведки - метод отраженных волн).

3. Интерференционный метод, основанный на интерференции прямой и отраженной радиоволн, и возвратный метод, в котором используются совмещенные источник и приемник (в настоящее время существует похожий, но несравнимо более развитый метод георадара).
4. Волномерный метод, предназначенный для радиоволнового каротажа скважин.

Не останавливаясь на других геофизических методах, описанных в учебнике А.И. Заборовского, отметим лишь, что в отличие от электромагнитных, сейсмических и ядерно-геофизических методов, описание которых представляет скорее историческую ценность, основы теории гравиразведки и магниторазведки даны практически на современном уровне.

Отражение тенденций развития в трудах А.И. Заборовского.

Работы А.И. Заборовского по электроразведке относятся к самому бурному периоду ее развития (30-е - 60-е гг.), позволяя проследить всю динамику процесса.

В 1943 г. вышел ставший классическим учебник А.И. Заборовского “Электроразведка”, который уже был посвящен только электромагнитным методам [9]. В нем автор впервые в четкой форме выделил условия эффективной применимости электромагнитных методов - необходимость большого размера тела, являющегося объектом поисков, в сравнении с глубиной его залегания, низкого уровня аппаратурно-методических и геологических помех, а также значительного контраста свойств объекта поисков и вмещающих пород.

Много внимания в работе уделено рассмотрению электрических свойств пород. В частности, детально разобрана зависимость УЭС пород от размера и формы зерен, от минерализации порового раствора и химического состава солей, от температуры.

Классификация методов электроразведки основана на зависимости от времени и подразделяет методы на методы постоянного, низкочастотного, среднечастотного и высокочастотного тока. Для изучения больших глубин автор рекомендует применять постоянный ток, для изучения малых глубин - постоянный или переменный ток (после появления низкочастотных индукционных зондирований все это стало верно с точностью до наоборот), для изучения сверхмалых глубин - высокочастотные методы, взамен бурения с керном - каротаж.

А.И. Заборовский подчеркнул, что электроразведка может применяться как для поиска и разведки полезных ископаемых, так и для инженерно-геологических и гидрогеологических целей, в том числе для “изучения трасс трубопроводов с целью организации наиболее рациональных мер борьбы с коррозией труб”.

Теория методов постоянного тока изложена в учебнике удивительно органично и современно. В частности, рассмотрены закон Кирхгофа, закон Ома, уравнение Лапласа, различные типы заземлений и их систем. Описаны различные типы используемых установок, аппаратура и методика ВЭЗ и ЭП. Приведено решение прямой задачи ВЭЗ для горизонтально-слоистой среды. Изложены принципы теории палеток ВЭЗ, причины эквивалентности кривых ВЭЗ, основы их графического построения, приемы интерпретации. Рассмотрена прямая задача для шара, находящегося как в поле однородного тока, так и в поле точечных электродов, прямая задача для эллипсоида в однородном поле. Проанализирована структура электрического и магнитного поля в анизотропной среде.

А.И. Заборовский рассмотрел также основы теории и принципы применения других методов, использующих постоянные и естественные поля : метода ЕП, метода заряженного тела, метода определения направления и скорости движения подземного

водного потока, метода теллурических токов, нового метода дипольных зондирований, каротажа методами сопротивлений и естественного поля.

Теория постоянного тока рассмотрена автором в большем объеме, чем переменного. Как пишет сам А.И. Заборовский, это обусловлено тремя причинами. Во-первых, теория постоянного тока отличается простотой, поэтому лучше, подробно рассмотрев ее, перейти от простого к сложному. Во-вторых, теория постоянного тока лучше развита. В-третьих, методы постоянного тока применяются чаще. Из теории методов переменного тока рассмотрено лишь несколько основных вопросов - об анализе уравнений Максвелла, о структуре гармонического поля, о поле простейших гармонических источников в однородной среде. Естественно, что теория переменного тока этого уровня не позволяет проводить зондирования. Поэтому, хотя число упомянутых далее методов переменного тока велико, о каждом рассказано очень коротко, причем для всех характерна сугубо качественная интерпретация.

В послевоенные годы исследования ИФЗ АН, ЛГУ и ВНИИ Геофизики показали, что применение низкочастотных электромагнитных полей позволяет изучать строение Земли до больших глубин. А.Н. Тихонов и Л. Каньяр наметили пути использования вариаций теллурического поля для целей электроразведки. Помимо гармонического поля, изучался процесс становления поля. Широко развернутые Московскими и Ленинградскими учеными исследования переменных полей повлекли за собой внедрение в производство методов ЧЗ, ЗС, магнитотеллурики. В этих исследованиях принимал участие и А.И. Заборовский. В 1960 г. им была написана монография "Переменные электромагнитные поля в электроразведке" [10], систематизировавшая результаты, полученные при изучении переменных полей, и дополнявшая их новыми сведениями.

В данной работе А.И. Заборовский рассмотрел плотность тока в Земле как сумму плотностей первичных и вторичных токов, остановился на вопросах, связанных с поляризацией электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля, привел телеграфное уравнение для электродинамических потенциалов. Он описал решения важнейших задач электроразведки, связанных с переменными полями искусственных источников - задачи о поле горизонтального электрического диполя над однородным полупространством, над двухслойкой и над горизонтально-слоистой средой и задачи о поле вертикального магнитного диполя над однородным полупространством и над двухслойкой.

Дальнейшее развитие теория электроразведки получила во втором издании книги А.И. Заборовского "Электроразведка", вышедшем в 1963 г [11]. Рассмотрим те моменты, которыми эта его работа отличается от рассмотренных выше.

1. В классификацию вошла группа методов нестационарного поля, включившая методы ВП и ЗС.
2. Для изучения больших глубин рекомендуется применять уже не метод сопротивлений, а методы переменного тока низкой частоты.
3. В описании аппаратуры методов постоянного тока появилось описание разработанных в послевоенные годы генераторных станций на базе автомобилей, используемых в методе дипольных зондирований на постоянном токе (ДЗ). Кроме того, изменено описание методики ДЗ, теория и принципы применения этого метода стали лучше вписываться в часть, посвященную методам постоянного тока.
4. Появилась строгая и развитая теория методов переменного тока. Рассмотрено решение задачи о плоском гармоническом поле над горизонтально-слоистой средой. Описана методика методов МТГ, ЧЗ, ЗС а рассмотренные в предыдущем издании методы переменного поля потеснились, уступив им место.

Теория и практика электроразведки испытала два резких скачка в своем развитии - после окончания Гражданской войны, когда были внедрены методы постоянного тока, и после Великой Отечественной, когда появились низкочастотные методы переменного тока. Второе издание книги А.И. Заборовского “Электроразведка” приурочено как раз к окончанию этого этапа и поэтому описывает практически все принципы, на которых базируется современная электроразведка. В совокупности с фундаментальным уклоном, выдержанным в этой работе, это делает ее актуальной и сейчас.

Вклад профессоров кафедры геофизики МГУ в дело науки и образования.

Как уже отмечалось, А.И. Заборовскому в бытность заведующим кафедрой геофизики МГУ удалось создать вокруг себя дружный коллектив талантливых ученых и преподавателей, воспитать целое поколение своих последователей, чьи дальнейшие работы в области науки и образования отличались системным подходом и фундаментальностью, сохраняя тем самым лучшие традиции Московского университета.

В числе первых выпускников кафедры геофизики МГУ был ее нынешний профессор, выдающийся ученый М.Н. Бердичевский, о котором будет рассказано ниже.

Одним из учеников А.И. Заборовского на кафедре геофизики МГУ является профессор Виктор Казимирович Хмелевской. В.К. Хмелевской стал основным продолжателем его работ в области совершенствования геофизического образования в стенах Московского университета.

Практически вся деятельность В.К. Хмелевского связана с кафедрой геофизики МГУ. Поступив в МГУ в 1947 г. и окончив аспирантуру кафедры геофизических методов исследования геологического факультета МГУ в 1956 г., он проработал на кафедре на всех должностях от инженера до заведующего кафедрой (с 1990 г.), став академиком РАН (с 1997 г.).

В.К. Хмелевской внес большой вклад в совершенствование ряда методов электроразведки путем создания и внедрения экспрессных номографических способов интерпретации всех электромагнитных зондирований, разработки методологии интерпретации и принципов применения мерзлотно-гляциологической, инженерно-геологической и гидрогеологической электроразведки. Следует отдельно отметить его исследования в области теории и методики подземной электроразведки в закарстованных массивах горных пород, разработку методов радиопросвечивания и радиолокации, а также участие в создании метода ядерно-магнитного резонансного томографического зондирования (ЯМР-ТЗ). В последнее время он является научным руководителем исследований, связанных с комплексированием электромагнитных зондирований с целью повышения надежности интерпретации и получения непрерывных сведений о разрезе в диапазоне глубин от первых метров до первых сотен километров.

В.К. Хмелевской является автором нескольких книг, ставших основными учебниками по электроразведке для студентов-геофизиков МГУ и основными учебниками по геофизическим методам - для студентов-геологов МГУ. В их число, входят “Основной курс электроразведки” (часть 1 “Электроразведка постоянным током” - 1970 г., часть 2 “Электроразведка переменным током” - 1971 г., часть 3 “Электроразведка в комплексе геолого-геофизических исследований” 1975 г.),

“Электроразведка” (1984 г.), “Краткий курс разведочной геофизики” (первое издание - 1967 г., второе издание - 1979 г.), другие учебники по геофизике (1988, 1997 г.).

Другой ученик А.И. Заборовского - Борис Константинович Матвеев после окончания МГУ переехал в Пермь и в настоящее время является профессором кафедры геофизики Пермского университета. Он продолжает поддерживать с московскими учеными тесные рабочие связи, а основанная им в Перми электроразведочная школа фактически берет свое начало от геофизической школы МГУ. Б.К. Матвеев хорошо известен в нашей стране своими научными работами и учебниками по электроразведке и электромагнитным зондированиям в частности. Две основные его работы - монография “Интерпретация электромагнитных зондирований” (1974 г.) и учебник “Электроразведка” (первое издание - 1982 г., второе - 1990 г.) широко используются в учебной и научной работе.

Начиная с 1949 г. на кафедре геофизики МГУ развивается направление, связанное с использованием геофизических методов для решения инженерно-геологических и гидрогеологических задач. Организатором и руководителем этого направления стал Александр Александрович Огильви, на данный момент старейший преподаватель кафедры.

Александр Александрович Огильви родился в 1915 г. в Пятигорске. В 1934 году он поступил на геофизическое отделение МГРИ, после чего работал младшим научным сотрудником в НИИ ГЕРЕДМЕТ. В 1940 г. А.А. Огильви перешел на работу в трест Гидроэнергопроект, где организовал отдел геофизики, заведующим которого был до 1949 г. В 1947 г. он защитил кандидатскую диссертацию. С 1948 г. является старшим преподавателем кафедры геофизики МГУ, с 1955 г. - доцентом. В 1962 г. А.А. Огильви защитил докторскую диссертацию, с 1965 г. - профессор, а с 1985 - профессор-консультант кафедры геофизики МГУ.

А.А. Огильви одним из первых в СССР начал заниматься разработкой вопросов теории и практики применения электроразведочных и других геофизических методов к решению инженерно-геологических и гидрогеологических задач. В течение многих лет он принимал участие в руководстве проводимых кафедрой работ по изучению обводненности месторождений твердых полезных ископаемых, по изучению инженерных сооружений и гидромелиоративным исследованиям, по изучению месторождений подземных вод и геологических процессов.

А.А. Огильви является автором учебников “Геофизические методы исследования” (1964 г.), “Основы инженерной геофизики” (1990 г.), а также большого числа научных работ и учебных пособий.

Математические методы, разработанные А.Н. Тихоновым и В.И. Дмитриевым.

Развитие математической теории решения прямых и обратных задач электроразведки тесно связано с деятельностью профессоров факультета вычислительной математики и кибернетики (ВМК) МГУ, и в первую очередь - основателя и первого декана этого факультета, замечательного ученого-геофизика Андрея Николаевича Тихонова.

А.Н. Тихонов занимался проблемами геофизики с 1930 г., работая в Государственном геофизическом институте гидрометеорологической службы, затем в отделе геофизики Института географии, в Институте теоретической геофизики, в ИФЗ АН СССР. В 1936 г. он защитил докторскую диссертацию. С 1936 года является член-

корреспондентом, а с 1966 г. - академиком АН СССР. В 1970 г. А.Н. Тихонов организовал и возглавил факультет ВМК.

Учеником и основным продолжателем его работ является профессор ВМК Владимир Иванович Дмитриев. С 1958 г. он работал в ИФЗ АН СССР, а с 1962 г. начал работать в НИВЦ МГУ, в том числе (с 1967 г.) заместителем директора и заведующим отделом геофизики НИВЦ МГУ. В 1967 г. В.И. Дмитриев защитил докторскую диссертацию, с 1969 г. - профессор. С 1982 г. он работает на факультете ВМК заместителем декана и заведующим лабораторией математической физики.

Фундаментальные работы А.Н. Тихонова в области электроразведки положили начало развитию новых электроразведочных методов, а его математические результаты стимулировали новые постановки задач в рамках традиционной методики электроразведки, способствуя резкому росту ее эффективности. Для творчества А.Н. Тихонова, как и для исследований его учеников, характерно сочетание актуальной тематики по электроразведке с разработкой фундаментальных математических проблем. Его основные достижения, имеющие прямое отношение к электроразведке, связаны с разработкой двух направлений - развитием математической теории электромагнитных полей в неоднородных средах и разработкой общих математических методов решения обратных задач геофизики.

В 1949 г. А.Н. Тихонов доказал теорему единственности решения обратной задачи ВЭЗ и оценил разрешающую способность этого метода. Анализ математической модели становления электрического поля в проводящей среде (1946 г.) и поведения естественного электромагнитного поля Земли (1950 г.) показал, что эти процессы могут быть использованы непосредственно для определения электрических свойств среды. Исходя из этого, А.Н. Тихоновым было сделано предложение об использовании магнитотеллурического поля для изучения глубинного строения Земли, через несколько лет доведенное Л. Каньяром до построения интерпретационной схемы МТЗ. Кроме того, практически параллельно с Ленинградским геофизиком С.М. Шейнманном им был предложен и разработан метод ЗС. В дальнейшем А.Н. Тихонов сыграл ведущую роль в развитии теории метода ЧЗ, предложенного А.П. Краевым.

Создание теоретических основ методов МТЗ, ЗС, ЧЗ было основано на создании численных методов моделирования электромагнитного поля в слоистых средах. Позднее В.И. Дмитриевым (1963 г.) был разработан общий метод расчета электромагнитных полей в слоистых средах от произвольных источников, расположенных в любой точке пространства.

В последние годы в работах В.И. Дмитриева созданы методы моделирования электромагнитных полей в трехмерных неоднородных средах, а также начаты работы по созданию систем математического моделирования задач электроразведки. Математическое моделирование позволяет проводить анализ разрешающей способности и чувствительности методов геофизики, изучать характерные особенности полей и влияние на них различных параметров среды. При создании систем математического моделирования важную роль играют численные методы, которые позволяют эффективно проводить расчеты для класса моделей среды. Во многом именно благодаря работам В.И. Дмитриева в настоящее время существуют несколько способов решения прямых задач для моделей сред любой сложности, соотношения между которыми представлены на схеме:



Принципы решения обратных задач геофизики, также разработанные А.Н. Тихоновым и В.И. Дмитриевым, касаются, вообще говоря, не только электроразведки, но и всей геофизики. Однако область их применения в электроразведке, пожалуй, наиболее широка. В частности, Тихоновская теория решения обратных задач позволила проводить компьютерную автоматическую интерпретацию данных электроразведки с учетом априорной информации.

Создание принципов применения магнитотеллурики М.Н. Бердичевским.

Профессору МГУ Марку Наумовичу Бердичевскому принадлежит ведущая роль в разработке теории магнитотеллурических методов - метода теллурических токов (МТТ), магнитотеллурического профилирования (МТП) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ), основанных на регистрации естественного переменного электромагнитного поля Земли. Во многом именно его работы повлекли за собой их широкое практическое использование.

М. Н. Бердичевский родился в 1923 г. в Киеве. В 1940 г. он поступил на геологический факультет Киевского университета, но в 1941 г. был призван в Советскую Армию, а в 1945 - ранен и демобилизован. Вернувшись в Киев, он продолжил учебу в Киевском университете. В 1946 г. М.Н. Бердичевский переехал в Москву и продолжил обучение в Московском университете на геолого-почвенном факультете, который он закончил в 1949 г. С 1949 по 1969 гг. он работал во ВНИИ Геофизики. В 1953 г. защитил кандидатскую, а в 1967 - докторскую диссертацию. С 1969 г. М.Н. Бердичевский - профессор кафедры геофизики МГУ.

История магнитотеллурических методов берет свое начало еще с 1912 г., когда К. Шлюмберже предложил использовать естественное переменное поле Земли для геологических целей. Поскольку геометрия и интенсивность источников этого поля, расположенных в ионосфере и магнитосфере, не могут быть определены достаточно точно, он предложил использовать синхронные наблюдения в двух достаточно близко расположенных точках. В этом случае интенсивность источников и удаление от них в обеих точках практически одинаково, и различия в структуре поля объясняются различием геологического строения в этих точках. Этот метод был реализован в 1934

г., но не вполне успешно и в весьма ограниченном объеме - большего тогда не позволял уровень развития теории, методики, аппаратуры.

Второе рождение метод получил в послевоенное время. С 1953 г. во ВНИИ Геофизики под руководством А.М. Загармистра была развернута работа по созданию методов низкочастотного переменного тока. В ее рамках М.Н. Бердичевским и другими сотрудниками института был значительно переработан и усовершенствован и метод МТТ. Во ВНИИ Геофизики и Институте машиноведения и автоматики АН УССР была также разработана необходимая аппаратура. В конце 50-х гг. метод начал активно внедряться в производство, и в 1960-м году работало уже около ста партий МТТ. С помощью этого метода за несколько лет была исследована почти вся западная часть западной Сибири, было найдено несколько месторождений. Метод МТТ применялся лишь до 1965-го года, и был затем вытеснен более совершенным методом МТП. Теория, принципы применения, особенности обработки и интерпретации данных метода МТТ были изложены в опубликованной в 1960 г. монографии М.Н. Бердичевского “Электрическая разведка методом теллурических токов” [12].

Необходимость использования метода МТТ автор видел в том, что традиционно применяемая в то время при работах на нефть гравиразведка и магниторазведка давали слишком мало информации для надежного геологического истолкования результатов. Этим была вызвана необходимость их комплексирования с другими геофизическими методами, например, с электроразведкой. Однако применение наиболее распространенного в то время метода ВЭЗ для поиска и разведки нефтяных месторождений было малоэффективно из-за необходимости использования больших приемных и питающих линий, мощных генераторов, экранирующего влияния высокоомных слоев осадочного чехла и других причин. Несмотря на то, что метод МТТ давал меньше информации, чем ВЭЗ, он был более технологичен, требуя небольшой измерительной установки, и был основан на использовании естественного поля. Помимо этого, для него не стояла так остро проблема высокоомного экрана.

Далее в работе М.Н. Бердичевский рассмотрел структуру поля теллурических токов, выделил типы вариаций этого поля. Он подробно и полно рассмотрел прямую задачу магнитотеллурики для горизонтально-слоистой среды. Автор также проанализировал типичные кривые кажущегося сопротивления, рассмотрел их асимптоты, эквивалентность. Пожалуй, в данной монографии впервые проведен очень подробный математический анализ поля теллурических токов в горизонтально-неоднородной среде, рассмотрена структура поля над простейшими геологическими телами - вертикальным пластом, антиклиналью, вертикальным уступом, анизотропной складкой.

М.Н. Бердичевский также привел описание методики, аппаратуры метода, проанализировал влияние помех. Им были описаны принципы обработки теллурограмм, способы изображения результатов наблюдений, наконец, способы качественной и количественной интерпретации с примерами применения метода.

Еще в 1950-м г. вышла статья А.Н. Тихонова, в которой он впервые предложил использовать измерения в одной точке с регистрацией двух компонент магнитотеллурического поля с последующей нормировкой одной на другую для устранения влияния интенсивности и геометрии источника и получения информации о разрезе в точке наблюдения. В начале 60-х гг. на этом принципе был создан метод МТП. Этот метод, пришедший на смену МТТ, с современной точки зрения также был не идеален по точности и производительности. Принцип его применения заключался в визуальном определении периода и амплитуды квазисинусоидальных колебаний по осциллографической записи. Однако для начала 60-х гг. это был большой шаг вперед, во многих случаях ускоривший и удешевивший геологоразведочный процесс.

Благодаря работам этим методом было открыто крупнейшее в мире Уренгойское газовое месторождение. Этому методу была посвящена еще одна, вышедшая в 1968 г., книга М.Н. Бердичевского “Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования” [13].

В первую очередь автор отметил, что метод МТП наиболее эффективен в комплексе с методом МТЗ, дающим гораздо больший объем информации о разрезе, причем уже не качественной, а количественной, но еще очень малопроизводительным.

В данной монографии М.Н. Бердичевский впервые описал им теорию обработки и интерпретации МТП и МТЗ, рассчитанную на строгий учет двухмерных и трехмерных неоднородностей среды. Автор вводит в рассмотрение тензор импеданса, импедансные полярные диаграммы, эффективный импеданс, продольную и поперечную поляризации поля. Проводится также математический анализ поля над двухмерными моделями, соответствующими характерным геологическим структурам. Все это и сегодня составляет фундаментальную основу успешного применения магнитотеллурики.

Заслуживает внимания также глава, посвященная перспективам развития этих методов. Во-первых, здесь рассматриваются принципы применения комбинированного МТП, основанного на регистрации поля в двух точках для борьбы с некоррелируемыми помехами. Во - вторых, приводятся основы теории гармонического анализа колебаний магнитотеллурического поля. Как показало время, эти два направления действительно вызвали максимальный научный интерес в последующие годы, оставаясь актуальными до сегодняшнего дня.

Современная теория М.Н. Бердичевского магнитотеллурики и других методов.

Идеи, изложенные в вышеупомянутой статье А.Н. Тихонова, были подхвачены и развиты французским геофизиком Луи Каньяром. Л Каньяр по аналогии с методом ВЭЗ ввел кажущееся сопротивление и построил первые кривые МТЗ, показав тем самым, что и принципы интерпретации методов переменного тока, и сама их идеология могут быть построены по аналогии с методами постоянного тока. Его статья, вышедшая в 1953 г., фактически содержала одномерную интерпретационную схему МТЗ, близкую к современной. В дальнейшем метод непрерывно и быстро развивался в СССР и в США. Первоначально для внедрения МТЗ нужно было решить два вопроса - значительно повысить точность и научиться делать спектральную обработку получаемых данных. Через несколько лет магнитологом Брюнелли был создан фотоманометр с обратной связью, решивший аппаратную проблему точности. В 1952-1953 гг. Винер предложил обобщенный статистический анализ, на основе которого можно было решить и проблему обработки, однако в СССР основанное им научное направление было не в почете. Поэтому лишь в 1966 г. на основе только что построенной теории математической фильтрации была создана цифровая электроразведочная станция И.А. Безрука, позволившая проводить регистрацию и первичную обработку компонент магнитотеллурического поля. В итоге лишь с конца 60-х - начала 70-х гг. основной магнитотеллурический метод оформился в современном виде.

Однако дальнейшее развитие этого метода было на редкость быстрым и эффективным. Метод МТЗ первым из всех электромагнитных зондирований стал применяться для изучения достаточно сложных двухмерных и даже трехмерных сред. Именно для МТЗ М.Н. Бердичевским и В.И. Дмитриевым была создана теория

искажений кривых МТЗ. В нашей стране и за рубежом было создано большое число компьютерных программ для математического моделирования МТЗ в двухмерных и трехмерных средах, а также для обработки, анализа и интерпретации полевых данных этого метода. Фундаментальные достижения в области разработки теории МТЗ и основные принципы применения и интерпретации данных метода в одномерных и в горизонтально-неоднородных средах изложены в работах “Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли” (М.Н. Бердичевский, М.С. Жданов - 1981 г.) и “Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред” (М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев - 1992 г.).

Помимо работ в области магнитотеллурических методов следует отметить также разработку М.Н. Бердичевским совместно с М.С. Ждановым спектрального подхода к представлению полей, а также вторую (после Л.Л. Ваньяна) попытку создания единой теории всех электромагнитных зондирований, причем именно с использованием этого спектрального подхода. Результаты этих разработок наиболее полно и систематично представлены в вышедшем в 1986 г. учебнике М.С. Жданова “Электроразведка”, в котором наряду с методом МТЗ с этих позиций рассматриваются и другие электромагнитные зондирования [14].

В книге описаны основы теории методов постоянного тока, кроме того, с использованием спектральных представлений поля рассчитывается электрическое поле точечного источника и диполя в горизонтально-слоистой среде, после чего с помощью преобразования Фурье-Бесселя выводится выражение для электрических полей в горизонтально-слоистой среде через преобразования Ханкеля. Рассмотрены также аппаратура, методика, сущность методов ВЭЗ, ДЗ, ЭП, принципы их машинной интерпретации.

При описании метода МТЗ вводятся в рассмотрения и анализируются следующие понятия:

1. Соотношения между компонентами поля через магнитотеллурические операторы.
2. Спектральные представления поля в горизонтально-слоистой среде.
3. Внешняя и внутренняя, нормальная и аномальная части поля.
4. Неоднородные пленки Прайса-Шейнманна и Тихонова-Дмитриева, аппроксимирующие тонкие слои, интегральная проводимость или интегральное сопротивление которых могут меняться по площади.
5. Математическое двухмерное и трехмерное моделирование полей методами интегральных уравнений и конечных разностей.
6. Цифровая узкополосая фильтрация и корреляционный метод определения магнитотеллурических и индукционных матриц, используемые для обработки полевых данных.
7. Теория искажений кривых МТЗ.

Далее вводятся спектральные представления для поля гармонических горизонтального электрического и вертикального магнитного диполей, расположенных на поверхности горизонтально-слоистой среды, с их помощью для этой модели решается прямая задача ЧЗ, анализируется поле этих источников в ближней и дальней зонах. Достаточно много внимания отводится теории метода ЗС - описываются основы спектрального метода расчета неустановившихся полей, структура поля на поверхности однородного полупространства, наконец, структура поля магнитного диполя, расположенного над пленкой Прайса-Шейнманна. Рассмотрена аппаратура, методика и принципы интерпретации методов ЧЗ и ЗС, а также особенности работы с мощнейшими источниками тока - МГД-генераторами.

М.Н. Бердичевский на высочайшем научном уровне продолжает работу по созданию и совершенствованию теории электромагнитных зондирований в целом и

метода МТЗ в частности. Поэтому его роль в развитии магнитотеллурики остается ведущей. Абсолютно уверенно можно сказать, что в настоящий момент М.Н. Бердичевский - наиболее известный и уважаемый ученый среди отечественных электроразведчиков как в России, так и во всем мире.

Достижения других московских ученых.

В Москве, являющейся одним из крупнейших в мире научных центров, расположено сразу несколько учебно-научных и научных учреждений, среди которых, помимо уже упомянутого Московского университета, хотелось бы в первую очередь отметить МГРИ. Геофизическую школу этого института основал А.И. Заборовский, и практически все ее профессора являются его учениками. Среди них - ученый-электроразведчик с мировым именем Лев Моисеевич Альпин.

Л.М. Альпин долгое время работал на кафедре геофизики МГРИ вместе с А.И. Заборовским, а после его ухода в МГУ стал заведующим этой кафедрой и основным продолжателем дела своего учителя. Научная и педагогическая деятельность Л.М. Альпина касалась многих областей, среди которых в первую очередь хотелось бы выделить разработку метода дипольных зондирований (ДЗ) и написание учебника "Теория поля", ставшего основным для студентов-геофизиков нашей страны учебником по этому направлению.

К тому времени, как в 1937 г. фирма Шлюмберже завершила свою деятельность в СССР, работы методом ВЭЗ в глубинном варианте (для поиска месторождений нефти и газа) в районах с неглубоким залеганием фундамента проводились уже более чем двадцатью партиями, а в 1940-м г. их число приблизилось к пятидесяти. Однако тогда же начался еще более быстрый прогресс в области поиска нефтяных месторождений сейсмическими методами. Помимо этого, когда были начаты работы в районах с глубоким залеганием фундамента и наличием в верхней части разреза чехла прослоев гипсов с высоким сопротивлением, оказалось, что для того, чтобы ток прошел сквозь экран, необходимы разносы порядка 20 - 30 км. Помимо очевидного снижения технологичности, это привело также к увеличению влияния процессов становления поля, индукционных наводок, а в конечном итоге - к потере точности. Стал очевиден кризис старой электроразведки на нефть и газ - глубинных ВЭЗ. В то же время низкочастотные методы (ЧЗ, ЗС, МТЗ) к тому моменту еще не были разработаны.

Именно в этот момент спас положение Л.М. Альпин, продолживший метод ДЗ, отличающийся от ВЭЗ тем, что питающий и приемный диполь располагаются в разных точках, причем их длина гораздо меньше расстояния между ними. Это позволило использовать питающие и приемные линии длиной всего 1 - 2 км. К этому времени вместо батарей в качестве источников тока стали использовать специальные генераторы, отказались от визуальной регистрации сигнала. Все это позволило в течение нескольких лет, по истечении которых низкочастотные зондирования все же вытеснили зондирования на постоянном токе при глубинных исследованиях, довольно успешно проводить глубинные работы методом ДЗ. Сейчас, когда методы постоянного тока используются лишь для малоглубинных исследований, наряду с ВЭЗ используют и ДЗ, кроме того, дипольные установки используются и в методе ЭП.

Работая во МГРИ, Л.М. Альпин читал студентам-геофизикам курс теории поля, лежащей в основе всей теории электроразведки. На его основе в 1966 г. им был написан фундаментальный учебник "Теория поля", который может рассматриваться и как монография [15]. В нем автор рассмотрел скалярные и векторные поля, их

производные. Далее он отдельно проанализировал структуру и основные закономерности статических полей (гравитационного, магнитного и электрического) в вакууме и в присутствии среды, стационарного электрического поля и магнитного поля постоянного тока, переменного электромагнитного поля (в том числе гармонического). В 1971 г. этот учебник был дополнен вышедшей книгой Л.М. Альпина “Практические работы по теории поля”, содержащей задачи, примеры, решения и пояснения. Наконец, в 1985 г. вышла книга Л.М. Альпина, Д.С. Даева и А.Д. Каринского “Теория полей, применяемых в разведочной геофизике”, отличающаяся от книги 1966 года наличием глав, посвященных теории упругости, значительно расширенными разделами, посвященными переменному электромагнитному полю, современным изложением вопросов, касающихся возбудителей поля, его геометрии, пространственных производных, магнитного поля постоянного тока.

В послевоенные годы по инициативе А.И. Заборовского во МГРИ были начаты работы по созданию методов индуктивной электроразведки. Они стали ведущим направлением деятельности многих ученых, как работавших во МГРИ, так и перешедших после окончания института в другие организации.

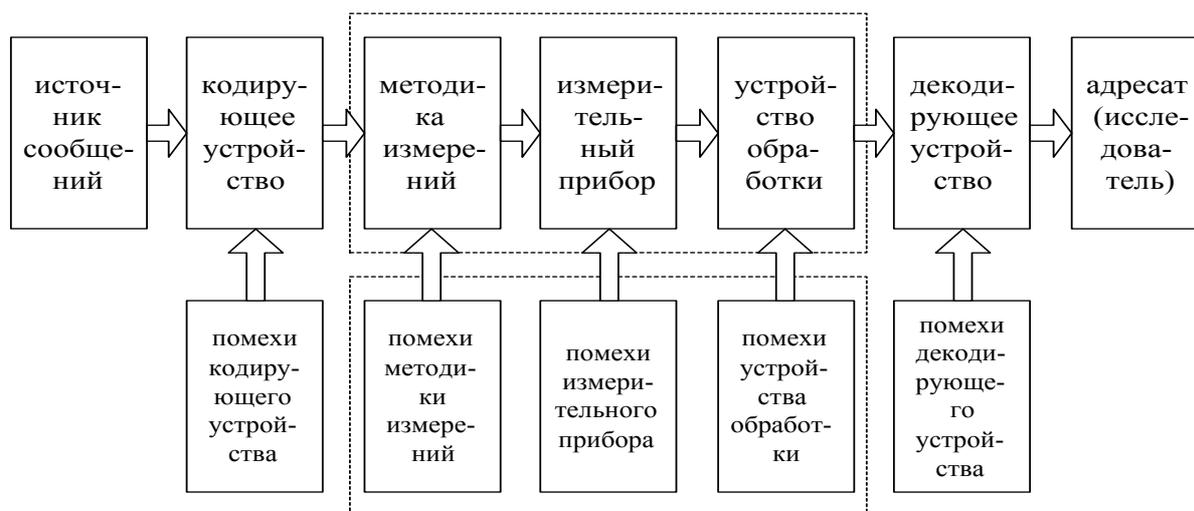
В этой связи в первую очередь хотелось бы остановиться на личности нынешнего профессора МГРИ Юрия Владимировича Якубовского. Его монография 1963-го года “Индуктивный метод электроразведки” стала первой фундаментальной работой в области индуктивных методов [16]. В ней собрана исчерпывающая информация по этим методам - методу незаземленной петли, методу бесконечно длинного кабеля, методу дипольного индукционного профилирования, методу переходных процессов. Рассмотрены физико-математические основы этих методов, аппаратура и методика полевых работ. Приведены результаты применения этих методов на Северо-Кавказской группе медноколчеданных месторождений, Южно-Уральской группе медноколчеданных месторождений, Хаутоваарском месторождении в Карелии и Горевском полиметаллическом месторождении.

Ю.В. Якубовский в течение многих лет активно участвует в организации учебного процесса в стенах МГРИ. В этих рамках им были созданы учебники по электроразведке, написанные совместно с Л.Л. Ляховым (вышло 5 изданий) и самостоятельно (вышло 2 издания).

Одним из выпускников кафедры геофизики МГРИ является авторитетный ученый-геофизик Борис Сергеевич Светов. По окончании института он также принимал участие в работах в области индуктивных методов электроразведки. В 1962 г. под научным руководством Л.М. Альпина им была защищена кандидатская диссертация на тему “Низкочастотный индуктивный способ электроразведки рудных месторождений”. Позднее Б.С. Светов стал одним из ведущих специалистов, работающих в рамках этого направления. Он является автором множества статей и нескольких монографий, в том числе известной работы “Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индукционной электроразведки”, вышедшей в 1973 году [17].

В ней автор подробно описал принципы физического моделирования - одного из двух (наряду с математическим моделированием) основных способов решения сложных прямых задач. Он рассмотрел принципиальные и технические основы физического моделирования, особенности моделирования хорошо проводящих объектов в непроводящей среде и моделирования горизонтально-неоднородных сред.

Далее автор показал способы применения теории информации к низкочастотной электроразведке. На основе этой теории он провел оценку измерительных устройств и результатов наблюдения. Он также ввел в рассмотрение следующую модель системы геофизических исследований :



Помимо этого, Б.С. Светов описал методику, аппаратуру, принципы применения методов незаземленной петли, дипольных индукционных исследований и аэроэлектроразведки методом дипольного индукционного профилирования.

Основные работы Л.Л. Ваньяна.

Последний Московский ученый, о котором хотелось бы рассказать, но далеко не последний по вкладу в теорию и практику электроразведки - Леонид Львович Ваньян. Его научная деятельность началась в конце 50-х - начале 60-х гг. с работ по созданию низкочастотных электромагнитных зондирований. Его первая книга “Электроразведка по методу становления магнитного поля”, вышедшая в 1963 г., посвящена принципам применения нового для того времени метода ЗС [18]. Метод ЗС с электрическим питающим и магнитным приемным диполем получил широкое применение с 1961 г.

В своей монографии Л.Л. Ваньян рассмотрел временной и спектральный способы решения задачи о неустановившемся вертикальном магнитном поле электрического диполя на поверхности горизонтально-слоистой среды, привел и проанализировал типичные теоретические кривые ЗС. Он показал, что разрешающая способность кривых зависит от разноса, а пределы действия принципа эквивалентности в методе ЗС, как и в других электромагнитных зондированиях на переменном токе, уже, чем в ВЭЗ.

Метод ЗС занял ведущее положение среди индукционных зондирований с контролируемыми источниками, хотя, казалось бы, это должен был быть метод ЧЗ, обладающий более простой теорией (не требует перехода из частотной во временную) и повышенной помехоустойчивостью (сигнал создается и измеряется на одной частоте, остальные гармоники отфильтровываются, в то время как в методе ЗС регистрируется весь спектр сигнала, в том числе помеха). Объясняется это тем, что метод ЧЗ требовал специфичной аппаратуры, тогда как для метода ЗС требовалось несколько усовершенствовать аппаратуру, существовавшую для методов постоянного тока. Аппаратура для метода ЧЗ разрабатывалась в АН СССР, но сделать ее стабильной в реальных условиях не удавалось, поскольку она не справлялась с магнитотеллурическими помехами на низких частотах, хотя ее разработка

осуществлялась под руководством прекрасного специалиста Б.С. Эненштейна. Серийного производства этой аппаратуры так и не было, поэтому нишу ЧЗ заполнил метод ЗС.

К тому времени уже существовала концепция В.А. Фока, объясняющая способ передачи электромагнитного возбуждения в точку, расположенную на некотором удалении от источника. Фок выделил два типа возбуждения - первого рода, распространяющееся по проводящей среде с тепловой потерей энергии, и второго рода, распространяющееся по изолятору почти без энергетических потерь. Область, в которую попадает только возбуждение второго рода, была названа дальней зоной. Л.Л. Ваньян первым предложил использовать в методах ЧЗ и ЗС большие - отвечающие дальней зоне - расстояния между питающим и приемным диполями, и использовать приближение дальней зоны при решении прямых и обратных задач. Это предложение сыграло революционную роль в электроразведке, сильно упрощая теорию ЧЗ и ЗС и приближая ее к теории МТЗ, хотя и оказалось, что им можно воспользоваться не всегда.

На этой основе Л.Л. Ваньяном впервые в СССР (а может быть, и в мире) была сделана серьезная попытка создания единой теории электромагнитных зондирований, методика и принципы интерпретации которых имели много общего, а теория в силу сложившихся традиций развивалась раздельно. В 1965 г. вышла его классическая монография “Основы электромагнитных зондирований” [19].

В первой части, посвященной прямой задаче электромагнитных зондирований, показан вывод математических выражений для гармонического электромагнитного поля дипольных источников в слоистой анизотропной среде и на поверхности однородного анизотропного полупространства, описываются методы численного расчета квазистационарного электромагнитного поля на поверхности слоистой анизотропной среды. Что касается предложенных методов расчета, то они достаточно быстро устарели, уступив в начале 70-х гг. место методам линейной фильтрации. Выражения же для различных компонент поля различных дипольных источников, полученные Л.Л. Ваньяном, до сих пор включаются в учебники, программируются, служат основой для новых научных разработок.

Вторая часть монографии посвящена анализу закономерностей квазистационарных электромагнитных зондирований. Здесь автором впервые были сформулированы два принципа электромагнитных зондирований : геометрический и индукционный. Далее он рассмотрел основные проблемы электромагнитных зондирований : эквивалентность тонких пластов, влияние плохо проводящих экранов, микроанизотропии и макроанизотропии. Сравнивая особенности индукционных и геометрических зондирований, Л.Л. Ваньян отмечает, что индукционные зондирования обладают постоянством разности, поэтому технологичны, но требуют сложной аппаратуры. Кроме того, индукционные зондирования позволяют изучать продольные сопротивления напластований, а геометрические зондирования - их среднеквадратичные сопротивления. Наконец , на результаты индукционных зондирований значительно слабее влияет высокоомный экран.

Вполне естественно, что Л.Л. Ваньяну через несколько лет стало тесно в рамках электромагнитных зондирований с контролируемыми источниками, и он активно включился в работу по совершенствованию метода МТЗ. В результате этой работы им (в соавторстве) были написаны две монографии.

Первая книга (“Магнитотеллурические зондирования слоистых сред”) вышла в 1980 г. и была посвящена особенностям применения МТЗ в горизонтально-однородных средах [20]. В ней, в частности, рассмотрены закономерности распределения вариаций в магнитосфере и ионосфере, а также математические основы теории МТЗ -

преобразование Фурье для выделения синусоидальных гармоник и принципы расчета кривых МТЗ. Кроме того, показана связь амплитудных и фазовых кривых, приведен альбом амплитудных и фазовых кривых МТЗ для различных одномерных моделей.

Вторая монография (“Интерпретация данных МТЗ неоднородных сред”), вышедшая в 1984 г., посвящена особенностям применения МТЗ в горизонтально-неоднородных средах [21]. В ней рассмотрены электромагнитные свойства и структура осадочного чехла, консолидированной земной коры, верхней мантии. Построены модели геоэлектрического разреза платформенных и активных областей. Изложена теория спектрально-итерационного моделирования МТЗ трехмерно-неоднородных слоистых разрезов, а также принципы применение разностных методов для расчета полей МТЗ в неоднородных средах. На редкость полно и подробно представлены важнейшие результаты численного моделирования МТЗ при неоднородном осадочном чехле.

Совсем недавно вышла новая работа Л.Л. Ваньяна “Электромагнитные зондирования”, призванная, по словам самого автора, с единой точки зрения сделать обзор всех модификации электромагнитных зондирований, рассмотреть общие свойства и различия индукционного и гальванического возбуждения [22]. Она в доработанной форме содержит материал его исторической книги 1965-го года “Основы электромагнитных зондирований”, часть материала двух вышеупомянутых работ по МТЗ, а также рассматривает следующие вопросы :

1. закономерности становления поля в ближней зоне;
2. роль горизонтального скин-эффекта в частотных зондированиях океанского дна;
3. обнаружение высокой электропроводности глубинных зон континентальной земной коры;
4. магнитовариационное зондирование Луны;
5. влияние современных моделей магнитосферно-ионосферных токов на магнитотеллурические зондирования.

Другие электроразведочные школы и направления.

Конечно, Ленинградская и Московская школы были не единственными в истории отечественной электроразведки, хотя их вклад в развитие науки и образования в нашей стране был наибольшим. Не вдаваясь в подробности, сделаем краткий обзор работ других школ.

Во второй половине 60-х - начале 70-х гг. на первый план вышла Новосибирская школа, возглавляемая ученым-геофизиком Александром Аркадьевичем Кауфманом. За менее чем десятилетний срок им совместно с Г.М. Морозовой, Ю.Н. Антоновым, А.А. Табаровским и другими было издано более десятка монографий, посвященных теории и принципам применения индуктивной рудной электроразведки, индукционного каротажа и электромагнитных зондирований - в первую очередь МТЗ и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Работы по созданию и совершенствованию метода ЗСБ, начатые А.А. Кауфманом, продолжаются Новосибирским геофизиком М.И. Эповым.

Идея метода ЗСБ была предложена в конце 60-х гг. почти одновременно Новосибирскими учеными и Саратовскими учеными из Нижне-Волжского НИИ геологии и геофизики, где исследования велись под руководством Владислава Александровича Сидорова и Вячеслава Васильевича Тикшаева. Их первая совместная работа “Электроразведка зондированием становлением поля в ближней зоне”

появилась в 1969 г. Позднее они вели работу скорее параллельными курсами, нежели совместно. Монографии В.А. Сидорова, посвященные методу ЗСБ, выходили в 1972, 1977 и 1985 гг., монографии В.В. Тикшаева - в 1973, 1983 и 1988 гг. К сожалению, недавно В.В. Тикшаева не стало. Роль работ этих ученых, одними из первых показавших, что нестационарное поле в ближней зоне не менее информативно, чем в дальней, очень велика.

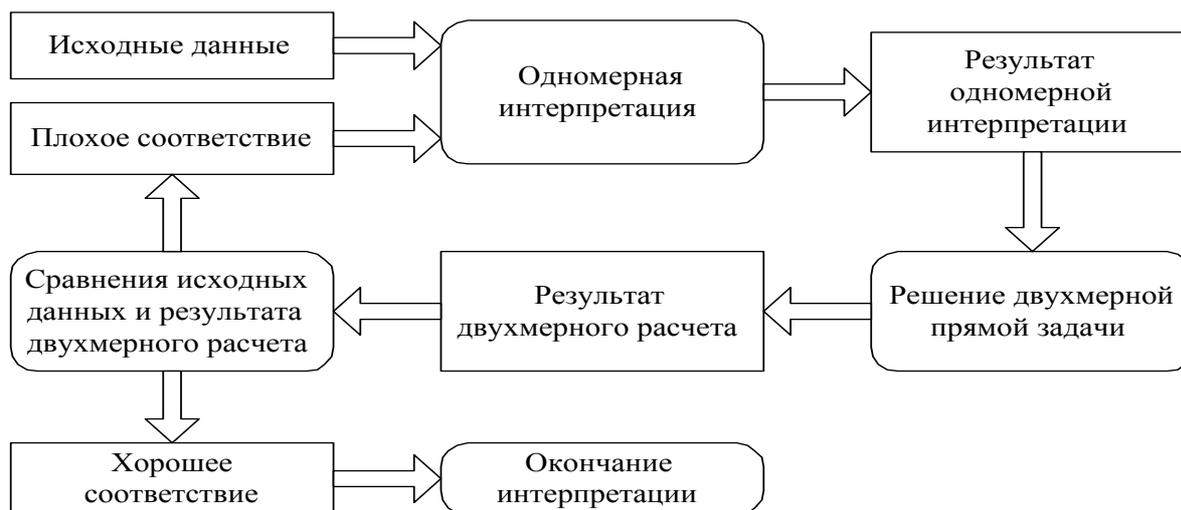
В конце 80-х гг. получил дальнейшее развитие еще один метод низкочастотного переменного тока - метод ЧЗ. А.В. Куликовым были разработаны теоретические основы, методические, технические средства и способы интерпретации низкочастотной электроразведки с возможностью получения информации не только о проводимости, но и поляризуемости Земли применительно к задачам как рудной, так и нефтегазовой разведки. Данный метод получил название ЧЗ-ВП и, несмотря на резкое снижение финансирования геофизических работ, был в некотором объеме внедрен в производство в конце 80-х - начале 90-х гг.

Помимо методов ЗСБ и ЧЗ-ВП, хотелось бы кратко упомянуть еще об одном направлении в электроразведке - ее аэроварианте. В отличие от некоторых западных стран (Канада, Финляндия) у нас аэроэлектроразведка не получила широкого применения, хотя появилась достаточно давно. В СССР, а затем в России она в основном развивалась в двух модификациях - дипольного индуктивного профилирования в аэроварианте (ДИП-А) и аэроварианта метода переходных процессов (А-МПП). В первом случае регистрируется переменное магнитное поле гармонического источника на двух - четырех частотах, во втором - возбужденное импульсом заданной формы устанавливающееся поле на нескольких временах задержки. Преимуществами аэроэлектроразведки перед наземными методами являются ее экспрессность, дешевизна и возможность работы в труднодоступных местах, недостатками - малая глубинность, невысокая точность, отсутствие возможности проведения зондирований. В России крупнейшей аэроэлектроразведочной организацией является московское ГНПП "Аэрогеофизика".

Заключение.

Завершая обзор развития отечественной электроразведки, хотелось бы проанализировать ее современное состояние и дальнейшие перспективы.

Усложнение математических моделей среды шло постоянно и особенно ускорилось в последнее время в связи с появлением персональных компьютеров. Создано большое число программ для одномерной интерпретации всех основных методов электроразведки - электромагнитных зондирований (ВЭЗ, ДЗ, ЧЗ, ЗС, МТЗ), в том числе с учетом вызванной поляризации пород. При интерпретации методов ВЭЗ, МТЗ и ЗС все шире используются программы решения двухмерных прямых задач. Схему современного процесса интерпретации этих методов можно представить следующим образом:



Первоначально по исходным данным с использованием соответствующей программы осуществляется одномерная интерпретация. По ее результатам проводится расчет двумерной задачи. Получаемый результат сравнивается с исходными данными и при хорошем соответствии интерпретация заканчивается. При неудовлетворительном соответствии анализируются его причины, и с их учетом исходные данные одномерно переинтерпретируются, далее все операции повторяются до тех пор, пока не будет достигнуто хорошее соответствие между результатом двумерного расчета и исходными данными. Решение прямых трехмерных задач используется пока лишь при моделировании, а не в процессе интерпретации данных.

Основные направления развития в рамках этой схемы видятся, согласно М.Н. Бердичевскому и Б.С. Светову [23], в разработке эффективных алгоритмов решения прямых и обратных задач, построении стандартных систем диалоговой интерпретации, создании библиотек фундаментальных моделей и др.

Одновременно с развитием в этом направлении, названном М.Н. Бердичевским и Б.С. Световым классической геоэлектрикой, все громче заявляет о себе неклассическая геоэлектрика, новое и перспективнейшее направление электроразведки, связанное с изучением нелинейных явлений, процессов взаимодействия геофизических полей (например, электрического и сейсмического), частотной дисперсии электромагнитных свойств сред, что позволяет существенно повысить разрешающую способность электроразведки и ставить задачи, считавшиеся нерешаемыми с помощью геофизических методов еще несколько лет назад.

В реферате я изложил факты, интерпретировать которые можно по-разному. В заключение хотелось бы со своей субъективной точки зрения выделить основные этапы в развитии отечественной электроразведки.

Первый этап начался в послереволюционные годы в условиях полного господства геологических методов, имеющих ограниченные возможности. Именно тогда разработка и внедрение методов постоянного тока позволило резко повысить эффективность геологоразведочного процесса.

Второй этап относится к послевоенному периоду истории нашей страны. Повышение требований к геофизическим методам, появление новых задач в условиях жесткой конкуренции с сейсмическими методами привели к полному кризису старой глубинной электроразведки постоянным током. Внедрение низкочастотных индуктивных методов спасло положение и вновь вывело электроразведку в ряд ведущих геофизических методов.

Третий этап начинается в настоящее время. Очередной виток повышения требований привел к новым стандартам в детальности и надежности интерпретации. За счет того, что поле упругих волн имеет более простую структуру, чем электромагнитное поле, сейсмические методы смогли во многом удовлетворить этим требованиям. Электроразведка в этом отношении заметно отстала, и лишь в последние годы наметился прогресс как в области усложнения интерпретационных моделей в рамках классической геоэлектрики, так и в области создания принципов применения высокоразрешающей неклассической геоэлектрики. На мой взгляд, в ближайшие годы все это приведет к третьему резкому рывку в развитии электроразведки и к появлению новых высокоэффективных технологий.

Список использованной литературы.

- [1] Петровский А.А., Нестеров Л.Я. “Электроразведка постоянным током”. Л., ГЕОЛГИЗ, 1932.
- [2] Семенов А.С. “Электроразведка методом естественного электрического поля”. Л., Недра, 1968.
- [3] Бурсиан В.Р. “Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке” (первое издание). Л., ГТТИ, 1933.
- [4] Бурсиан В.Р. “Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке” (второе издание). Л., Недра, 1972.
- [5] Краев А.П. “Основы геоэлектрики”. Л., Недра, 1965.
- [6] Шейнманн С.М. “Современные физические основы теории электроразведки”. Л., Недра, 1969.

- [7] Комаров В.А. “Электроразведка методом вызванной поляризации”. Л., Недра, 1972.
- [8] Заборовский А.И. “Геофизические методы разведки”. М., ГНТГИ, 1932.
- [9] Заборовский А.И. “Электроразведка”. М., ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1943.
- [10] Заборовский А.И. “Переменные электромагнитные поля в электроразведке”. М., Изд-во МГУ, 1960.
- [11] Заборовский А.И. “Электроразведка”. М., ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1963.
- [12] Бердичевский М.Н. “Электрическая разведка методом теллурических токов”. М., ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1960.
- [13] Бердичевский М.Н. “Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования”. М., Недра, 1968.
- [14] Жданов М.С. “Электроразведка”. М., Недра, 1986.
- [15] Альпин Л.М. “Теория поля”. М., Недра, 1966.
- [16] Якубовский Ю.В. “Индуктивный метод электроразведки”. М., ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1963.
- [17] Светов Б.С. “Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки”. М., Недра, 1973.
- [18] Ваньян Л.Л., Бобровников Л.З. “Электроразведка по методу становления магнитного поля”. М., ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1963.
- [19] Ваньян Л.Л. “Основы электромагнитных зондирований”. М., Недра, 1965.
- [20] Ваньян Л.Л., Бутковская А.И. “Магнитотеллурические зондирования слоистых сред”. М., Недра, 1980.
- [21] Ваньян Л.Л., Дебабов А.С., Юдин М.Н. “Интерпретация данных магнитотеллурических зондирований неоднородных сред”. М., Недра, 1984.
- [22] Ваньян Л.Л. “Электромагнитные зондирования”. М., Научный мир, 1997.
- [23] Бердичевский М.Н., Светов Б.С. “Современное состояние геоэлектрики и пути ее развития” - в книге “Сборник тезисов международной геофизической конференции и выставки Москва-97”. М., 1997.
- [24] Чернов В.Г. “Геологи Московского университета”. М., Изд-во МГУ, 1989.
- [25] “Научные геофизические школы Московского университета” - сборник докладов юбилейной конференции “100 лет со дня рождения А.И. Заборовского и 50 лет созданной им в МГУ кафедры геофизики”. М., 1994.