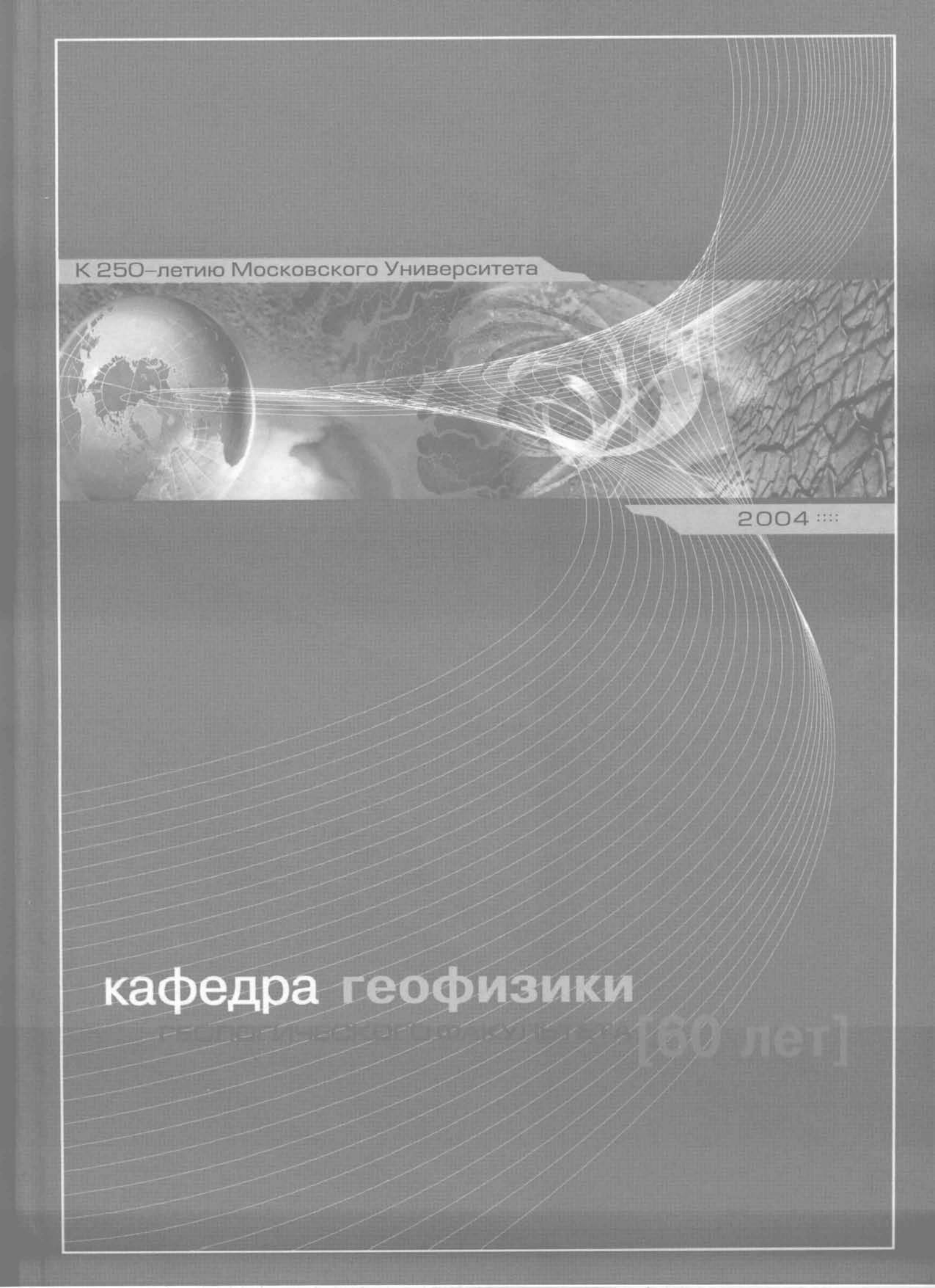




К 250-летию Московского Университета

2004 ::::

кафедра геофизики

геологического факультета [60 лет]

**ЛОМОНОСОВСКАЯ ШКОЛА МГУ
ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДАМ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗЕМНЫХ НЕДР:
ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
конгресса
выпускников-геофизиков геологического факультета МГУ
и научной конференции,
посвященных
60-летию кафедры геофизики и 250-летию Московского Университета
26 мая 2004 года**

МОСКВА • 2004

УДК 550.3
ББК 26.2
Н.34

**ЛОМОНОСОВСКАЯ ШКОЛА МГУ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДАМ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗЕМНЫХ НЕДР: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ. Сборник научных трудов. Под редакцией
В.К. Хмелевского. - Москва: МГУ, 2004.**

Настоящий сборник научных трудов приурочен к конгрессу-встрече выпускников-геофизиков геологического факультета и научной конференции 26 мая 2004 г., посвященных 60-летию кафедры геофизики и 250-летию Московского Университета.

Соавторами 48 докладов сборника являются 124 специалиста-геофизика, в основном выпускники отделения геофизики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. В первой части работы кроме вводных очерков о 250-летию Московского Университета и 60-летию кафедры геофизики дана характеристика достижений научных школ и научных направлений, оформившихся к “золотому веку прикладной геофизики” – 70-80 годам XX века. Создателями этих научных школ были преподаватели кафедры геофизики: А.И. Заборовский, В.В. Федынский, М.К. Полшков, В.А. Магницкий, Ю.В. Ризниченко, А.М. Епинатьева, А.А. Огильви, А.Н. Тихонов, Е.В. Карус, А.В. Калинин. Они возглавили научно-практические работы таких направлений как глубинная, морская, вычислительная, инженерно-гидрогеологическая геофизики.

Вторая и третья части работы отражают состояние и достижения по изучению Земли, ее литосферы и осадочного чехла научными геофизическими школами, возглавляемыми выпускниками отделения геофизики, их близкими коллегами и учениками. Здесь рассмотрены некоторые проблемы геодинамики, сейсмологии, вулканологии, геотермии, сейсмоакустики, сеймики, гравиметрии, магнитометрии, геоэлектрики, а также комплексирования геофизических методов при глубинных, структурных, морских, поисковых, инженерных, мерзлотных, почвенных и экологических задачах. В конце книги приводятся сведения об авторах статей.

Редакционная коллегия:

*А.А. Булычев, В.А. Богословский, А.Г. Гайнанов, Л.А. Золотая, Е.Б. Ильина, В.В. Кузьмина,
И.В. Лыгин, В.Р. Мелихов, Т.И. Облогина, П.Ю. Пушкарёв, З.Л. Сафонова.*

Выход в свет Сборника научных трудов, Альманаха, а также подготовка Конгресса выпускников-геофизиков геологического факультета МГУ и научной конференции, посвященных 60-летию кафедры геофизики и 250-летию Московского университета были бы невозможны без наших спонсоров:

*М.С. Рудяка, В.Н. Султанова, А.П. Жукова, Н.С. Дорофеева, А.С. Лаврика, И. С. Файзулина, Лео Фокс,
А.И. Ингерова, А.Ю. Акопян, Е.М. Вороновичевой, А.В. Егорова, В.А. Шевнина, И.А. Береснева, М.А. Василькова, Г.В. Белашова и др.*

ВКЛАД СОТРУДНИКОВ КАФЕДРЫ ГЕОФИЗИКИ В РАЗВИТИЕ МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

*И.Н. Модин, Д.К. Большаков, А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, С.И. Волков,
С.В. Иванова, М.Н. Марченко, В.А. Шевнин, Е.В. Перваго*

Введение

Последнее десятилетие (1994 - 2004 гг.) было временем исторической реконструкции нашего государства, эпохой установления новых приоритетов в области политики, экономики и образования. Значительно изменилась и геологическая отрасль. Не желая делать значительные вложения в геологическое картирование и разведку новых месторождений, правительство так и не пошло навстречу ожиданиям огромной армии геологов и геофизиков, обрекая ее большую часть на перемену жизненного уклада. В такой ситуации "на поле остались только самые сильные игроки", сумевшие предложить новые, законченные и востребованные технологии, включающие теорию, методику, аппаратуру, компьютеры и программное обеспечение, а также имеющие возможность быстро проводить полевые работы в любых погодных и климатических условиях. Постепенно сформировалось несколько областей, в которых оказалась востребованной электроразведка. И, прежде всего, приоритетными оказались все виды инженерной геофизики: инженерно-геологическая, гидрогеологическая, мерзлотная, экологическая, техническая и археологическая геофизика. При этом новые заказчики геофизических работ спонтанно и намеренно выдвинули дополнительные, жесткие требования к исполнителям. Во-первых, работы не прекращаются в зимних условиях, что предъявляет особые требования к аппаратуре, методике измерений и людям. Во-вторых, инженерно-геологические работы теперь должны проводиться на территории городов, где наблюдается высокий уровень промышленных помех и значительные территории заняты твердыми дорожными покрытиями. В-третьих, значительно сократились сроки работ, что выдвигает на передний край новые, высокопроизводительные технологии. В-четвертых, при решении широкого класса геотехнических задач постоянно повышаются требования к точности интерпретации и прогнозных оценок. И, наконец, в-пятых, предъявляются высокие требования к качеству отчетной документации, что предполагает достаточно высокий уровень технической и эстетической культуры исполнителей. Благодаря высокому накопленному потенциалу, лаборатория малоглубинной электроразведки закрепила на рынке геофизических услуг и в настоящее время занимает лидирующие позиции у нас в стране при решении научно-практических задач.

Теоретические исследования: прямые задачи

Основой для понимания сложной структуры электрического поля в неоднородных средах являются теорети-

ческие представления, развитию которых в прошедшем десятилетии уделялось первостепенное значение. Особенно заметный вклад в развитие теоретических представлений внес А.А. Бобачев. Им были получены интегральные уравнения для метода вторичных зарядов с учетом нормальной модели [4]. При этом предложено использовать функцию нормированного точечного источника

$$G^*(m, a) = \sigma_{cp}(a) G^j(a, m),$$

где $\sigma_{cp}(a)$ - средняя удельная проводимость в нормальном и реальном разрезах в окрестности источника поля, $G^j(a, m)$ - функция Грина нормальной модели, которая является потенциалом единичного точечного источника тока. Кроме этого, функцию источника можно представить в виде

$$G^*(a, m) = G(a, m) + \Phi(a, m) = \\ = G(a, m) + \int_{s_n} \frac{\Sigma(a, s)}{\epsilon_0} G(s, m) ds,$$

где $G(a, m)$ - фундаментальная функция Грина, а $\Phi(a, m)$ - потенциал в точке m , создаваемый вторичными зарядами $S(a, s)$, расположенными на границах нормального разреза, при существовании единичного источника поля в точке a . Использование предложенной А.А. Бобачевым функции нормированного точечного источника позволяет существенно упростить численное моделирование и рассчитать электрическое поле с учетом земной поверхности. Моделирование электрического поля в 2D-неоднородных средах показало, что при положительной форме рельефа при увеличении сопротивления насыпи аномалия кажущегося сопротивления падает, приближаясь в центре структуры к значению поля для нормального разреза.

А.А. Бобачевым с помощью метода вторичных зарядов разработан алгоритм построения линий тока в двумерно-неоднородных средах. Алгоритм основан на представлении о функции тока $\phi(x, z)$, которая в каждой точке проводящего пространства сопряжена с электрическим полем в соответствии с условием Коши-Римана [4]

$$E_x = -\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad E_y = -\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial \phi}{\partial x},$$

$$\phi = -\int E_x dy \quad \text{или} \quad \phi = -\int E_y dx,$$

где u - электрический потенциал. При этом u и ϕ являются гармоническими функциями и удовлетворяют уравнению Лапласа $\Delta u = 0$ и $\Delta \phi = 0$.

На основе наиболее общих представлений о распределении стационарного электрического поля в нижнем и верхнем полупространстве, А.А. Бобачевым описаны особенности электрического поля при использовании емкостного электрода и показано наличие "емкостной" асимптоты на малых разностях кривой ВЭЗ, которая возникает при использовании бесконтактных методик с незаземленными питающими и приемными электродами. Им же показаны граничные условия для стационарного электрического поля на границе земля-воздух и способы расчета поля при наличии неоднородностей в непроводящей части пространства.

Были продолжены исследования по разработке алгоритмов решения прямых задач для двумерно- и трехмерно-неоднородных сред. Е.В. Перваго была решена задача продолжения поля с помощью метода граничных элементов комплексного переменного [4]. Математический алгоритм был реализован в виде компьютерной программы. Было показано, что алгоритм выдерживает очень большие контрасты по сопротивлению и позволяет рассчитывать электрическое поле в присутствии металлических объектов. С помощью математического моделирования было доказано, что поведение аномального электрического поля над полостью, проводящей трубой аналогично электрическому полю над проводящим цилиндром того же диаметра. Оба этих тела проявляются как идеальные эквипотенциальные проводники. Моделирование поля над цилиндром требует гораздо меньшего количества элементов машинной памяти, что значительно ускоряет процедуру теоретических расчетов. А.А. Бобачевым разработан численный алгоритм прямой задачи для трехмерно-неоднородной среды на основе метода объемных интегральных уравнений. Показано, что решение задачи для контрастных проводников быстро сходится уже при сравнительно грубом разбиении среды на диполи. М.Н. Марченко разработал программу трехмерного моделирования на основе метода конечных разностей и на ряде моделей продемонстрировал высокую эффективность этого алгоритма. Эти две последние работы открывают прямую дорогу к автоматизированному решению обратной трехмерной задачи электроразведки для произвольно построенной среды.

Новые методики наблюдений

В течение нескольких последних лет технология сплошных электрических зондирований (СЭЗ - комбинированная трехэлектродная установка, в которой постоянный шаг по профилю равен шагу по разностям, - предложена И.Н. Модиныным в 1991 г. и впервые опробована в г. Ялта на оползне "Гнездышко") получила дальнейшее развитие [2, 3]. В последние годы ее используют не только в Московском университете, но в ряде других геофизических организаций, в том числе, и за рубежом. Несмотря на некоторую громоздкость этой установки, хорошие, физически понятные результаты сильно перекрывают ее недостатки в условиях сложно построенных сред. Для обработки данных СЭЗ были разработаны два алгоритма. Первый - метод главных компонент - коллективный труд А.А. Бобачева, М.Н. Марченко, А.В. Урусовой и Е.В. Перваго [1, 4] - построен на интерактивном вмешательстве интерпретатора в процесс обработки, в результате которой производится подавление компонент поля, вызванного приповерхностными не-

однородностями. Второй алгоритм разработан Е.В. Перваго и основан на пространственной фильтрации поля с помощью медианного осреднения. Оба алгоритма имеют свои преимущества и недостатки, а их совместное использование дает оптимальный результат, в котором влияние приповерхностных неоднородностей сводится к минимуму.

При изучении анизотропии по отношению к электрическому сопротивлению Д.К. Большаков, Е.В. Перваго и В.А. Шевнин [2] уделили большое внимание нелинейным азимутальным установкам, в которых приемные и питающие электроды не расположены вдоль одной прямой. Было показано, что для таких установок (например, дипольная экваториальная установка) отношение осей круговой диаграммы может достигать n^5 вместо n для обычных линейных установок (четырёхэлектродная установка Шлюмберже, трехэлектродная установка, потенциал-установка и т. п.). Исследования показали, что оптимальными для исследования анизотропии являются дипольная экваториальная (D-установка) и дифференциальная Y-установка (питающий электрод А расположен в центре круга О, В находится в физической бесконечности, приемный электрод М расположен на расстоянии r от электрода А, два электрода N_+ и N_- расположены на расстоянии $R > r$ зеркально и симметрично относительно оси ОМ). Установлено, что шаг наблюдений для D-установки должен быть не более 18° , а для Y-установки зависит от ее параметров и может быть больше, чем у D-установки (30° и даже 45°), выбор между D-установкой и Y-установкой зависит от решаемых задач.

Для контроля гидрогеологической обстановки на канале Одер-Шпрее (земля Бранденбург, Германия) совместно с лабораторией малоглубинной электроразведки геологического факультета МГУ разработала аппаратуру и программное обеспечение для акваторных электрометрических наблюдений (техническое задание - совместная разработка Д.Л. Коларова, фирма Umweltanalytik Brandenburg GmbH, И.Н. Модина, С.В. Волкова и Е.В. Перваго). В конструкции такого оборудования основная проблема состояла в управлении процессом измерения. Измерения проводились автоматически в движении в режиме реального времени. Системная управляющая программа (исполнитель С. И. Волков) разработана для многозадачной операционной системы Windows, что было вызвано необходимостью синхронизации работы всех узлов аппаратуры и процесса измерения. В состав оборудования входит управляющий компьютер типа Notebook, блок питания, генераторный блок, аналогово-цифровой преобразователь, аналоговая часть, которая включает измерительные кабели с электродами и усилители (разработка аппаратного комплекса выполнена Д.Л. Коларовым). Каждый сигнал из 32 каналов измерялся в течение 2 с. Так как использовался 16-и канальный аналогово-цифровой преобразователь, каждый цикл измерения производился с помощью переключателя групп по 16 каналов. Производились измерения четырех значений разности потенциалов естественного поля, сопротивления воды и разность потенциалов для 20 разностей дипольной осевой установки. При этом регистрировалось три продольные (относительно направления движения судна) компоненты и одна поперечная компонента естественного поля (E_{X1} , E_{X2} , E_{X3} , E_Y). Каждый канал был снабжен аналоговым усилителем, который одновременно

подавлял промышленные помехи. Для повышения устойчивости измеряемых сигналов выполнялось накопление и осреднение сигналов. Акваторные исследования были выполнены на каналах Одер-Шпрее и Катарини, на озерах Мюльрозе и Катарини. Обработка и интерпретация проводилась по программам, созданным Е.В. Перваго и А.А.Бобачевым. Геологическая интерпретация выполнена И.Н. Модиним, В.А. Шевниным и Д.К.Большаковым. На всех объектах отмечены интенсивные аномалии естественного поля, которые четко объясняются структурно-геологическими особенностями строения каждого конкретного участка.

Для определения положения, геометрии и удельного сопротивления объекта, расположенного в стороне от профиля наблюдений, разработана технология так называемой векторной съемки электрического поля (ВИЭП предложена И.Н. Модиним в 1992 г [2, 4] и впервые опробована в 1993 г. в г. Донецке на ул. Пухова при обследовании основания фундамента жилого дома в связи с существенными деформациями грунта). Сущность метода ВИЭП состоит в измерении двух взаимно-перпендикулярных компонент электрического поля в точках профиля или планшета съемки при нескольких положениях питающего электрода А вокруг предполагаемого положения объекта. При этом разнонаправленная поляризация трехмерного объекта исследования обеспечивает образование вторичных электрических зарядов на различных сторонах объекта. Для обработки и интерпретации данных ВИЭП введено понятие *вектора кажущегося сопротивления*, что не противоречит понятию кажущегося сопротивления, как нормированного электрического поля. В данном случае вектор кажущегося сопротивления является вектором электрического поля, нормированным на модуль плотности тока в точке измерения для однородного полупространства. Идея метода состоит в том, что вектор ρ_k можно представить в виде суммы нормального и аномального поля. При этом первая часть вызывается питающим электродом А и горизонтально-слоистым, фоновым разрезом, а вторая часть индуцируется за счет горизонтальных неоднородностей геоэлектрического разреза, на границах которых образуются вторичные электрические заряды. Вычитая из наблюденного поля фон, мы выделяем чисто аномальный остаток. В свою очередь он подвергается дальнейшей обработке и интерпретации, в результате которой определяется геометрия и свойства объекта.

Работы в городских и зимних условиях требуют выполнения бесконтактных измерений электрического поля. Для проведения работ используется многофункциональная электроразведочная аппаратура "ЭРА". В частности, в этой аппаратуре предусмотрена частота 625 Гц, которая возбуждается специальным генератором. В аппаратуре "ЭРА-Max" (фирма ЭРА, г. Санкт-Петербург) и в генераторе "ASTRA" (фирма "Северо-Запад", г. Москва) также предусмотрена рабочая частота 625 Гц. Существует довольно много вариантов проведения бесконтактных измерений. И.Н. Модиним [4] предложено несколько вариантов проведения бесконтактных зондирований наиболее приспособленных к городским условиям, в частности, вариант сплошных точечных зондирований (СТЗ), в которой АВ располагается перпендикулярно профилю наблюдений. При этом электрод В уносится в физическую бесконечность. Питающий электрод А располагается в центре установки. Для обеспече-

ния чисто гальванического стекания тока через АВ, питающие электроды должны быть хорошо заземлены. В противном случае часть тока будет стекать через распределенную емкость линии АВ. Приемная антенна MN перемещается слева и справа от электрода А по профилю с шагом, равным шагу между пикетами. В этом случае результаты могут быть трансформированы в обычные результаты СЭЗ путем переноса точки записи. Вторым вариантом зондирования используется, когда необходима площадная съемка части заасфальтированной дороги. Применяется экваториальная дипольная установка. Питающий диполь с гальваническим заземлением АВ устанавливается на газоне, а приемная антенна MN перемещается над твердым покрытием. После отработки одного зондирования вся установка параллельно смещается вдоль дороги. Такую съемку можно рассматривать и как электрические зондирования, если сгладить локальные эффекты от горизонтальных неоднородностей, и как электропрофилирование, если убрать тренд, связанный с фоновым, слоистым разрезом. В случае, когда невозможно заземление рабочего токового электрода, в качестве источника поля используется длинная, незаземленная линия, а приемная антенна перемещается перпендикулярно АВ. Структура электрического поля в этом случае подчиняется закону $1/(r)$. Все перечисленные установки опробованы в различных ситуациях и показали свою высокую эффективность.

Развитие методов интерпретации данных электроразведки

Новые методики наблюдения позволили увидеть влияние приповерхностных неоднородностей (геологический шум) и связанные с ним искажения кривых ВЭЗ. В результате стали активно развиваться программы, которые показывали искажения кривых ВЭЗ (программа IPI2D, автор А.А. Бобачев [3]) и эффективно подавляли эти искажения. Успешное подавление геологических помех существенно расширило область применимости одномерной интерпретации. Благодаря в основном усилиям А.А. Бобачева, была разработана и внедрена в десятки научных и производственных организаций система обработки, визуализации, анализа и интерпретации профильных данных ВЭЗ, которая в настоящее время известна как программа IPI_Win. Именно IPI_Win послужила прототипом по части дизайна для большинства отечественных программ одномерной интерпретации электромагнитных зондирований. В настоящее время программа включает различные алгоритмы автоматической и интерактивной одномерной интерпретации одиночных зондирований и групп кривых ВЭЗ, развитую систему визуализации данных и результатов, алгоритмы статистического анализа исходных данных и результатов интерпретации, средства обработки данных ВЭЗ для выявления и подавления искажений.

В рамках развития методики СЭЗ в 1999 г. была разработана программа быстрой автоматической 2D-инверсии данных ВЭЗ (программа TRF_2D_S, автор М.Н. Марченко [3]) с применением метода наименьших квадратов. Алгоритм разработан с применением выражений для линейных источников тока. Частные производные $\partial \rho_e / \partial \rho_i$ рассчитываются по методу интегральных уравнений без учета влияния вторичных источников в соседних блоках. Решение строится по следующему алгоритму. Сначала строится модель начального приближения,

затем рассчитываются частные производные (геометрия блоков закреплена), решается прямая задача и рассчитывается невязка экспериментального и теоретического полей кажущегося сопротивления, строится вычислительная схема метода наименьших квадратов, определяются поправки в параметры среды, и, наконец, рассчитывается новая модель среды. Поиск решения обратной задачи проводится с применением принципов регуляризации. Тестирование на модельных и реальных полевых материалах показало высокую вычислительную эффективность и устойчивость при решении обратной задачи.

В 2000 г. А.А. Горбуновым разработана программа, в которой определяется интенсивность и положение полюсов квазидиполя, как упрощенное решение 3D-задачи векторной съемки. Решение основано на предположении, что аномальное поле локального трехмерного объекта близко по структуре к полю, создаваемому квазидиполем. При этом полюсы квазидиполя примерно располагаются на границах объекта, который поляризуется под действием внешнего поля источника. Поэтому подход к интерпретации данных ВИЭП, предложенный А.А. Горбуновым, состоит в определении положений квазидиполей при различных положениях питающего электрода с последующим восстановлением очертаний геологических тел.

В середине 90-х годов Д.К. Большаков, И.Н. Модин, Е.В. Перваго и В.А. Шевнин [2] применили новый подход к обработке данных азимутальных наблюдений электрического поля с использованием спектрального анализа. Оказалось, что применение несимметричного вращения электроразведочной установки при площадных или профильных азимутальных наблюдениях дает возможность выявления анизотропии на фоне влияния неоднородностей. Анализ данных азимутальных наблюдений с использованием спектрального подхода позволяет получить количественные оценки, связанные с влиянием анизотропных свойств и неоднородностей среды. Для ослабления влияния неоднородностей при исследовании анизотропных свойств на этапе обработки данных необходимо использовать процедуры подавления нечетных гармоник. Игнорирование влияния анизотропии в рамках слоистой или неоднородной модели среды приводит к заметным ошибкам в интерпретации.

Практические результаты

В середине 90-х годов сразу несколько российских компаний разработали промышленные георадары, которые начали активно использоваться в практике инженерных исследований. Лаборатория малоглубинной электроразведки приобрела три георадара фирмы Radar Systems Ltd (г. Рига, Латвия). В течение последних лет с помощью георадара выполнены исследования на пресноводных озерах в Калужской области, на железнодорожных насыпях в Московской и Смоленской областях, на ряде археологических памятников Подмосковья, на водных переходах газопроводов и нефтепроводов через реки, при решении ряда инженерно-геологических задач. Главный вывод, который можно сделать из результатов этих исследований, заключается в том, что георадар, как метод, имеет значительные ограничения по глубинности, связанные с проводимостью среды. В подавляющем большинстве случаев глубинность метода не превышает 5 - 10 м. Данные о разработках, в

которых глубинность превышает 40 - 50 м, на наш взгляд, пока научно не подтверждены. Поэтому георадар может активно применяться в почвенной геофизике, археологии, при обследовании стен, аэродромных покрытий, шоссейных и железных дорог, в геокриологии.

На ряде объектов были выполнены исследования многолетнемерзлых пород на Севере, Северо-востоке и Дальнем Востоке нашей страны. При этом решались важные народно-хозяйственные проблемы: проектирование нефтепроводов в Архангельской области, оценка устойчивости производственных зданий в условиях неравномерного промерзания грунтов в Тюменской области, поиски и детальное изучение геометрии таликовых зон и отепляющего воздействия водоема на плотину на Арктическом побережье Чукотки [1]. Во всех случаях были продемонстрированы высокие возможности электроразведки при изучении границ между талыми и мерзлыми породами. В условиях достаточно низких среднегодовых температур (меньше $-5 \div -7$ °C), отмечается мерзлый слой пород глубиной до 300 м мощностью. На водоразделах нижняя граница мерзлоты может залегать на глубине 600 - 700 м. Верхняя граница мерзлоты, как правило, хорошо отмечается на результатах ВЭЗ. Обычно контраст по сопротивлениям между мерзлыми и талыми породами составляет 10, а в ряде случаев 30 - 50. В верхней части разреза в зоне активного морозного выветривания обычно наблюдается высокольдистый слой мощностью несколько метров, электрическое сопротивление которого может достигать 50 - 100 кОм·м. Нижняя граница мерзлоты картируется гораздо хуже по двум причинам: во - первых, за счет макроанизотропии интервал разносов проявленности границы на кривых ВЭЗ сильно смещается вправо. Поэтому, чтобы зафиксировать эту границу, нужны очень большие разносы, зачастую порядка нескольких км. Во-вторых, градиент температур внизу гораздо меньше, чем сверху. Соответственно и фазовый переход в условиях так называемой вялой мерзлоты выражен гораздо хуже. Когда среднегодовые температуры составляют $-1 - -2$ °C, а мерзлая толща сложена песчано-глинистыми отложениями, границы между талыми и мерзлыми породами могут иметь весьма причудливую форму. При этом на одной глубине песчано-глинистые породы могут быть мерзлыми, а могут быть талыми в зависимости от степени глинистости вещества. И, наоборот, одинаковые породы на разной глубине могут иметь различное фазовое состояние в зависимости от температуры и скорости движения подземных вод в конкретном месте. В такой ситуации возникает шлировая (тонкослоистая) мерзлота, которая, по сути, является переходным состоянием между талыми и мерзлыми породами и создает очень сильную анизотропию по отношению к электрическим свойствам в вертикальном направлении.

В 1994 - 1995 гг. совместно с немецкой фирмой Umweltanalytik Brandenburg GmbH в рамках конверсионной программы при организационной поддержке Федерального Центра Геоэкологических Систем (ФЦГС) при министерстве природных ресурсов выполнено обследование свалки промышленных и бытовых отходов в г. Калуга (Габцевский полигон). В работах принимали участие А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, М.Л. Владов, А.А. Горбунов, А.В. Любчикова, И.Н. Модин, А.В. Старовойтов, В.А. Шевнин и др. Работы включали электрические зондирования, георадарную съемку, съемку естествен-

ного поля и резистивиметрию, бурение, инженерно-геологические исследования и геохимические анализы. В результате этих работ было показано, что естественный гидроизолирующий слой ложа свалки (в тот момент ложе располагалось на глубине 17 м) находится в разрушенном состоянии. Флюиды свалки проникают на глубину до 30 - 40 м и на горизонтальное расстояние в несколько сот метров от свалки, образуя обширный "факел" вокруг тела свалки. Часть флюида вытекает через канализационную трубу в устье свалки, а часть - через грунт разгружается в ручей и затем попадает в реку. По результатам геофизических исследований была построена трехмерная модель тела свалки, включающая основные инженерно-геологические элементы и минерализацию массива горных пород.

В 1995 г. при финансовой поддержке ФЦГС лабораторией были выполнены исследования по картированию разливов нефтепродуктов. В конце этих работ был получен неожиданный результат: старые проливы нефтепродуктов ведут себя, как очень хорошие проводники, что нашло свое подтверждение в работах геохимиков - конечным результатом разложения органического вещества являются тяжелые органические кислоты, которые обладают низким электрическим сопротивлением. Точно такой же вывод позднее был сделан американскими геофизиками, которые проанализировали большой объем полевых данных и провели геохимические анализы загрязненных грунтов. Это открытие сделало возможным уверенное картирование с помощью электроразведки старых нефтяных проливов [4].

Начиная с 1997 г., в России активно развивается проект укладки трасс магистральных трубопроводов при переходах через крупные реки с помощью наклонно-направленного бурения. Проектирование такого перехода требует весьма ответственного инженерно-геологического заключения, которое выполняется на основе бурения и геофизических исследований, которые интерполируют разрезы между скважинами. Как правило, требуется выполнить электрические зондирования на самой акватории реки и по берегам, на участках поймы между устьем и забоем скважины. Обычно общая длина профиля детальных исследований составляет 1 - 2 км. На сегодняшний день сотрудниками лаборатории Д.К. Большаковым, М.Н. Марченко, И.Н. Модин, С.В. Ивановой отработана технология проведения электрических зондирований на суше и на реке, сделано 11 таких переходов (Подмосковье, Южное Приуралье, район Нижней Волги). В ходе интерпретации данных решаются вопросы обнаружения карстовых зон, ослабленных зон в коренных отложениях долины реки, картирования линз песков, глин, тонкого расчленения верхней терригенно-осадочной толщи [4].

В 1997 г. при финансовой поддержке АО "Сибнефтепровод" лаборатория включается в широкомасштабные обследования трасс нефтепроводов и нефтеперекачивающих станций в Западной Сибири. В этих работах принимали активное участие все сотрудники лаборатории малоглубинной электроразведки. В течение нескольких лет было обследовано несколько десятков километров трасс линейных трубопроводов, а также 6 крупнейших нефтеперекачивающих станций. При обследовании трасс трубопроводов решались следующие вопросы: точное положение трубы в плане и по глубине, состояние гидроизоляции трубопровода, электрохимическая, кор-

розионная активность грунта и строение верхней части вмещающего разреза, определение глубины проводящих пород с целью оптимального устройства анодных заземлителей. На нефтеперекачивающих станциях решались вопросы в основном экологического характера: геологическое строение до глубины 30 м и загрязненность грунтов нефтепродуктами, состояние изоляции днищ резервуаров, картирование подземных коммуникаций и составлений рабочих схем, глубина и состояние свайных конструкций, мерзлотная обстановка [4].

В 2000 г. совместно с кафедрой сейсмометрии и институтом Литосферы РАН в районе Станового хребта выполнены комплексные, геофизические исследования с целью выбора трассы проектируемой железной дороги и оценки инженерно-геологической и мерзлотной ситуации. Геофизический профиль длиной 200 км пролегал через наиболее сложный, труднодоступный участок трассы, соответствующий перевалу через Становой хребет в районе р. Алгамы. В работах принимали активное участие И.Н. Модин, А.А. Бобачев, М.Н. Марченко, С.В. Иванова, Д.В. Исаков, П.Ю. Степанов, А.Ю. Калашников и др. Комплекс геофизических методов включал сейсморазведку, вертикальные электрические зондирования и электропрофилирование, магниторазведку, георадар и радиометрию. Привязка точек на местности осуществлялась с помощью системы спутниковой навигации GPS. Связь с внешним миром происходила с помощью двух спутниковых телефонов, отработка профиля выполнена с 6 базовых лагерей, а передвижение от лагеря к лагерю производилось с помощью вертолета. Научное руководство экспедицией осуществлял А.В. Калинин. Основным достижением этой экспедиции была методика комплексирования геофизических работ. Суть ее заключалась в следующем. В пределах одного сегмента профиля (20 - 30 км) производится сейсмическое зондирование в 3 - 5 опорных точках. Непрерывно по всему профилю проведена георадарная съемка, с помощью которой, учитывая данные сейсморазведки, были протянуты границы практически вдоль всего профиля наблюдений на глубину до 25 - 30 метров (высокие электрические сопротивления мерзлых, скальных грунтов обеспечили высокую глубинность георадара). С помощью электрических зондирований слои между границами приобрели вещественную характеристику и были откартированы таликовые зоны. Магниторазведка позволила найти зоны тектонических нарушений. Радиометрия выполняла экологическую функцию, в основном гарантируя проектировщиков от неприятных неожиданностей, которые могли возникнуть при строительстве магистрали.

Традиционно на кафедре геофизики развивается археологическое направление. Последние годы стали временем активизации этих исследований. В работах принимали активное участие И.Н. Модин, Д.К. Большаков, А.А. Горбунов, С.В. Иванова, М.Н. Марченко, В.С. Сафронов, М.В. Калишева, А.В. Еременко, А.Ю. Паленов, С.В. Кузнецов и многие студенты отделения геофизики. Большие работы были выполнены по заказу Государственного управления по охране памятников при правительстве Москвы (ГУОП) по обследованию братских захоронений советских воинов, павших в период Великой Отечественной войны. Такие исследования были выполнены главным образом в районе г. Зеленоград и в северо-западной части Москвы. В 2003 г. ГУОП организовал геофизические работы на Братском кладбище в

районе метро Сокол. Детально была обследована территория общим размером 16 га. При этом основные работы были выполнены естественным полем по сети $1 \times 0,5$ м. На ключевых участках проводились измерения методом вызванной поляризации. Кроме этого в комплекс методов входила магниторазведка, георадар и бесконтактные электрические зондирования. В результате были показаны границы Братского кладбища, отдельные захоронения, откартирована аллея могил первых русских летчиков. Продолжаются исследования на Куликовом Поле с целью обнаружения могил русских воинов XIV века. По заказу государственного Исторического музея, музея-заповедника "Куликово Поле" и при организационной поддержке НПО "Геотехнология" выполнены работы на берегах рек Мокрая Табола, Непрядва и Дон. По приглашению Центра египтологии в г. Каире, при организационной и финансовой поддержке НПО "Геотехнология", начиная с 2001 г. проводятся исследования на территории древней столицы г. Мемфис. В 2003 г. начались раскопки, место для которых было выбрано исключительно по геофизическим данным. Первые результаты раскопок показали высокую эффективность геофизических методов. В период с 1998г. по 2001 г. проведены исследования на археологических памятниках железного века в районе Александровского полигона, на городищах Воротыньск и Любутск в Калужской области, где получены новые данные без нарушения исторических памятников.

Заключение

Малоглубинная электроразведка на кафедре геофизики переживает в настоящий момент пору своей зрелости. В лаборатории есть необходимая аппаратура для ведения полевых работ и студенческих практик, есть хорошо разработанный теоретический фундамент, есть новые методики и технологии, которые находятся в арсенале технических средств, есть большой накопленный опыт полевых исследований и есть специалисты, которые могут решать практически любые сложные проблемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическое зондирование геологической среды. П/ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. - М., Изд-во МГУ, 1988 - ч. 1, 1992 - ч. 2.
2. Электроразведка методом сопротивлений. П/ред. В. К. Хмелевского, В.А. Шевнина. - М., Изд-во МГУ, 1994.
3. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урусова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред. - Физика Земли, № 12, 1995 - 96 г.
4. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности. П/ред. В.А. Шевнина, В.Н. Богомазова. - М., РУС-СО, 1999.