

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В МОСКОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Дмитриев В.И., Пушкарев П.Ю., Хмелевской В.К.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, dmitriev@cs.msu.su

История прикладной геофизики, в частности электроразведки, в нашей стране тесно связана с Московским университетом имени М.В. Ломоносова. Огромный вклад в развитие теории и практики электроразведки внесли Александр Игнатьевич Заборовский (1894-1976) и Андрей Николаевич Тихонов (1906-1993).



Александр Игнатьевич Заборовский (1894-1976)

Профессор А.И. Заборовский является одним из создателей основных разделов прикладной геофизики, в первую очередь электроразведки, а также организатором геофизического образования в Москве и, в частности, в Московском университете.

В 1927-1929 годах А.И. Заборовский, уже опытный геофизик, проводил работы методом сопротивлений при изучении нефтяного месторождения в районе г. Грозного. Это были одни из первых электроразведочных нефтегазовых исследований. В этом же районе проводила работы, получившая широкий резонанс, фирма Шлюмберже.

В последующие годы А.И. Заборовский активно работал над развитием и применением методов электроразведки. Круг его научных интересов включал развитие теории и палеточных методов интерпретации данных метода ВЭЗ (вертикальных электрических зондирований) горизонтально-слоистых сред. Он провел оценку пределов действия принципа эквивалентности и исследовал влияние анизотропии.

А.И. Заборовским были приближенно решены прямые задачи о шаре и эллипсоиде в однородном электрическом поле и в поле точечных источников, что обеспечило создание научных подходов к интерпретации данных метода ЭП (электропрофилеирования). Решив ряд прямых задач для естественно поляризованных тел простой формы (шар, цилиндр, пласт), он предложил приёмы количественной интерпретации данных метода ЕП (естественного поля).

В предвоенные годы А.И. Заборовский написал классический учебник по электроразведке (1943), а позднее - книгу, посвящённую переменным электромагнитным

полям в электроразведке (1960). Эти работы послужили основой для развития и внедрения методов электроразведки.

А.И. Заборовский первым занялся подготовкой кадров в области геофизики. Он читал курсы геофизики, включая электроразведку, в 1923-1924 годах в Московской горной академии, а с 1926 года – на физико-математическом факультете МГУ. В 1930 году был создан Московский геологоразведочный институт, где благодаря усилиям А.И. Заборовского появился геофизический факультет, который он возглавил. Постепенно здесь сложилась мощная научная школа по рудной электроразведке. В 1944 году при его активном участии на геолого-почвенном факультете МГУ была открыта кафедра геофизики, которой он руководил в 1944-1949 и в 1955-68 годах.



В.А. Шевнин проводит практическое занятие по электроразведке

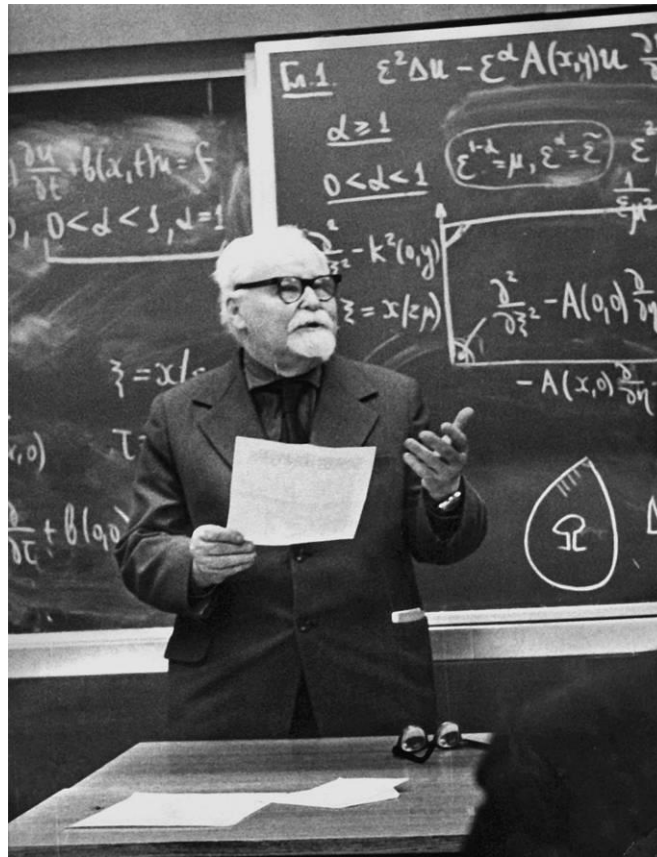
Кафедра геофизики геологического факультета МГУ активно вела разработку методов электроразведки. Работы А.И. Заборовского в области ВЭЗ, ЭП и ЕП легли в основу малоглубинной электроразведки, которая развивалась в МГУ его коллегами (А.А. Огильви, М.К. Крылов) и учениками (В.К. Хмелевской, В.А. Богословский).

В последние десятилетия в лаборатории малоглубинной электроразведки (В.А. Шевнин, И.Н. Модин, А.А. Бобачев, Д.К. Большаков и другие) разрабатывались:

- методы компьютерной интерпретации данных ВЭЗ, сначала в рамках одномерных, а затем и в рамках двумерных и трехмерных моделей среды;
- проблемы учёта приповерхностных и глубинных искажений электрических полей;
- новые системы наблюдений методом сопротивлений при решении различных инженерно-геологических, технических и археологических задач.

В настоящее время в лаборатории малоглубинной электроразведки ведётся разработка методики, аппаратуры и программного обеспечения для электротомографии и других методов сопротивлений (в том числе в акваторном варианте). Кроме того, прорабатываются вопросы комплексного применения методов сопротивлений, зондирования становлением поля, георадиолокации и других геофизических методов при решении широкого круга задач.

Научные исследования неразрывно связаны с учебным процессом, в работу вовлекаются аспиранты, магистранты и студенты кафедры геофизики. Помимо общего курса электроразведки и полевой учебной практики, которые проходят в бакалавриате, сотрудники лаборатории ведут курсы в рамках магистерской программы по малоглубинной геофизике. Это курсы «геологическая интерпретация данных электроразведки», «электроразведка неоднородных и анизотропных сред», «геофизика твёрдых полезных ископаемых», «экологическая геофизика», «техническая геофизика».



Андрей Николаевич Тихонов (1906-1993)

Выдающийся математик и геофизик, академик А.Н. Тихонов первые работы по электроразведке выполнил в начале Великой Отечественной войны, когда Институт теоретической геофизики, в котором он тогда работал, был эвакуирован в Казань, а затем в Уфу. Институт развернул работы в Башкирии по поиску нефтяных месторождений. Огромная территория между Волгой и Уралом была, по мнению геологов, перспективной на нефть, а в это время поиск новых месторождений был стратегической задачей. А.Н. Тихонов в составе одной из экспедиций института принимал непосредственное участие в полевых геофизических работах. С этого времени начинаются его работы в области разведочной геофизики. Вначале они были связаны с теорией интерпретации данных электроразведки на постоянном токе. А.Н. Тихоновым была доказана теорема единственности восстановления распределения электропроводности с глубиной по измерениям электрического поля на земной поверхности в зависимости от расстояния до источника поля.

Применительно к задаче интерпретации геофизических данных А.Н. Тихонов провел исследования по устойчивости обратной задачи. Из общих математических соображений она должна быть неустойчивой, но на практике решалась вполне устойчиво путем сопоставления экспериментальных кривых зондирования с рассчитанными. А.Н. Тихонов показал, что обратная задача будет устойчивой при выполнении определенных дополнительных условий на её решение. Эта работа явилась основой для разработки в 60–70-ые годы теории некорректно поставленных задач и методов их решения.

Применение методов постоянного тока при изучении глубоких слоев земной коры натолкнулось на большие трудности. В связи с поиском нефти в Западной Сибири, анализируя материалы полевых работ и пересматривая результаты зондирований на постоянном токе, А.Н. Тихонов пришел к выводу, что методы глубинного зондирования, основанные на применении постоянного тока, связаны с чрезвычайно большими погрешностями и что необходимо забраковать результаты многих поисковых партий.

Дело в том, что при измерении электрического поля сразу после включения постоянного тока возникают большие помехи, связанные с процессом становления поля,

занимающим довольно длительное время. Если же измерения проводятся в течение довольно длительного времени, когда процесс становления уже закончился, то на результаты наблюдения накладывается другой вид помехи - естественное переменное поле Земли. Стремление разобраться в физической стороне этого вопроса и найти возможности освободиться от возникающих ошибок позволило трактовать указанные помехи как самостоятельные физические процессы, которые могут быть использованы непосредственно для получения данных об электрических свойствах среды. Исходя из этого, А.Н. Тихоновым были предложены два новых направления в электроразведке: а) метод магнитотеллурического (МТ) зондирования, использующий естественное переменное электромагнитное поле Земли; б) метод становления электромагнитного поля, использующий процесс установления поля постоянного тока.

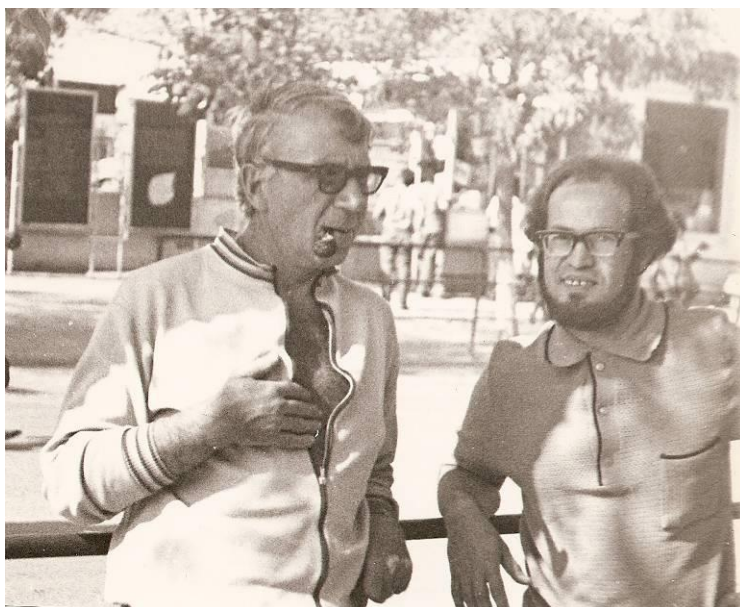
А.Н. Тихоновым было обосновано использование естественного электромагнитного поля Земли для получения геоэлектрического разреза. Естественное поле Земли изучалось и раньше, однако использовались или только электрические, или только магнитные компоненты поля. Предложенный А.Н.Тихоновым метод заключается в изучении частотной зависимости отношения электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля на поверхности Земли (импеданса) для определения электрических свойств ее внутренних слоев. При этом фундаментальное значение имеет доказанная А.Н. Тихоновым теорема единственности обратной задачи. Им показано, что распределение электропроводности по вертикали однозначно определяется частотной зависимостью импеданса. При использовании широкого спектра частот появляется возможность судить об электрическом строении земной коры и мантии. Созданные новые методы позволили выявить неоднородности в диапазоне от первых метров до сотен километров. Принципиальным результатом для физики Земли явилось установление факта быстрого возрастания электропроводности с глубиной в верхней мантии, что отражает рост глубинной температуры.

А.Н. Тихоновым проведен также большой цикл работ по теории методов электроразведки, использующих искусственные поля. Им решена задача о становлении электромагнитного поля в слоистом полупространстве при включении тока в питающий провод, расположенный на поверхности среды; разработан универсальный метод расчета электромагнитных полей в слоистых средах; получены асимптотические формулы для электромагнитных полей в слоистых средах на больших расстояниях от источника (для этого было проведено исследование асимптотического поведения специального класса несобственных интегралов, содержащих бесселевы функции). А.Н. Тихоновым была решена задача о возбуждении электромагнитного поля в слоистой анизотропной среде и при достаточно общих условиях показана возможность однозначного определения внутренних свойств среды по наблюдениям на ее поверхности. Следует отметить, что в случае анизотропной среды использование переменного тока особенно существенно, поскольку при анализе строения земной коры на постоянном токе приходится сталкиваться с тем, что для всякой анизотропной среды можно найти изотропную среду, дающую на поверхности то же значение наблюдаемого электрического поля.

Позднее теория электромагнитных зондирований (ЭМЗ) активно развивалась в Московском университете на кафедре геофизики геологического факультета и в лаборатории математической физики факультета ВМК. Большую роль здесь сыграло сотрудничество М.Н. Бердичевского, Л.Л. Ваньяна и В.И. Дмитриева. Исследования М.Н. Бердичевского были в основном связаны с развитием метода МТ-зондирования. Метод зондирования становлением поля и метод частотного зондирования развивал Л.Л. Ваньян. В.И. Дмитриев активно разрабатывал методы математического моделирования электромагнитных полей в неоднородных средах, а позднее, методы решения обратных задач ЭМЗ.

В 1970-х – 1980-х годах М.Н. Бердичевским и В.И. Дмитриевым были решены 2D и 3D задачи магнитотеллурики и создана теория искажений данных МТ-зондирований. В последующие годы они вместе с Л.Л. Ваньяном и М.С.Ждановым, а также со своими учениками, разработали методику интерпретации МТ-данных, с использованием которой

были построены глубинные геоэлектрические модели ряда регионов, а также изучено множество месторождений полезных ископаемых. Монографии М.Н. Бердичевского, В.И. Дмитриева, Л.Л. Ваньяна и М.С. Жданова по теории магнитотеллурики стали настольными книгами специалистов в этой области.



М.Н. Бердичевский и Э.Б. Файнберг

В настоящее время на кафедре геофизики геологического факультета МГУ, в лаборатории электромагнитных зондирований имени М.Н. Бердичевского, продолжается развитие и опробование методов зондирования с использованием естественных полей и полей управляемых источников (А.Г. Яковлев, Н.С. Голубцова, В.А. Куликов, Н.Л. Шустов, П.Ю. Пушкарев). Основным полигоном служит район Барятинской магнитной аномалии в Центральной части Восточно-Европейской платформы. Среди современных направлений исследований можно выделить разработку методики 3D интерпретации МТ-данных, организацию измерений длиннопериодных вариаций МТ-поля, а также продолжение работы по составлению карты электропроводности северной Евразии, которая велась в 1980-х годах под руководством М.Н. Бердичевского.

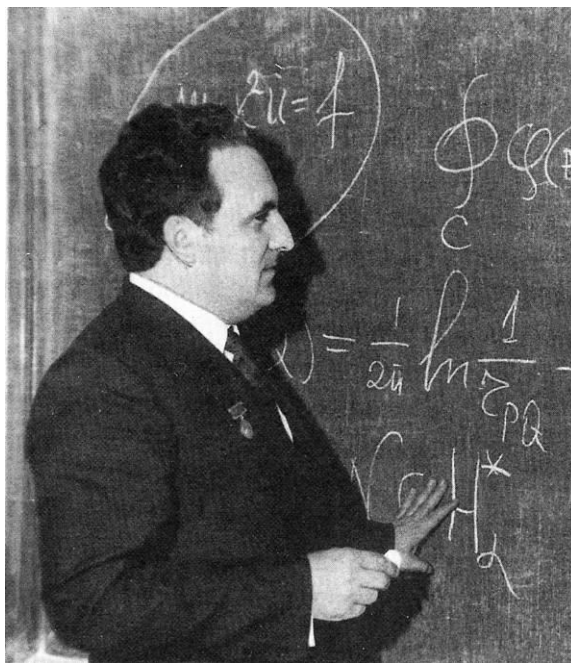


Участники Всесоюзной школы-семинара по электромагнитным зондированиям

М.Н. Бердичевский, Л.Л. Ваньян и В.И. Дмитриев организовали регулярные школы-семинары по электромагнитным зондированиям, которые существенно помогли развитию научных и практических исследований в этой области. На этих семинарах читались лекции по теории и практике электромагнитных зондирований, а также заслушивались доклады о результатах работ, выполненных участниками семинара. В МГУ всегда уделяли большое внимание развитию учебного процесса подготовки специалистов-геофизиков.

В 1972 году В.И. Дмитриев по инициативе М.Н. Бердичевского разработал новый курс «Теория геофизических полей», который затем модернизировал и читал много лет на геологическом факультете МГУ М.Н. Бердичевский. В 1980 году, в связи с активным развитием методов решения обратных задач геофизики, на геологическом факультете МГУ был введен курс «Методы решения некорректно поставленных задач», который разработал и много лет читал В.И. Дмитриев. Эти два курса, наряду с курсом «Электроразведка» и полевой учебной практикой, в настоящее время проводятся для студентов-геофизиков геологического факультета МГУ сотрудниками лаборатории ЭМЗ.

В рамках магистерской программы по глубинной геофизике они дополнительно ведут курсы «Теория электромагнитных зондирований» (ранее его читал М.Н. Бердичевский в течение примерно сорока лет), «Морская электроразведка» (его в конце 1990-х годов вёл Л.Л. Ваньян), «Модели и методы магнитотеллурики» (по одноимённой книге М.Н. Бердичевского и В.И. Дмитриева), «Геофизика твёрдых полезных ископаемых».



В.И. Дмитриев читает лекцию студентам

Большой цикл работ на факультете ВМК и геологическом факультете МГУ был проведен по внедрению методов решения некорректно поставленных задач, которые имеют фундаментальное значение для геофизики, так как являются основой для разработки общих принципов интерпретации наблюдений и методов решения обратных задач геофизики. По существу к обратным задачам сводятся все задачи интерпретации геофизических наблюдений. При изучении объектов или явлений природы, недоступных для непосредственного изучения и определяемых характеристикой z , пользуются изучением их физически детерминированных проявлений u . В геофизических исследованиях u является наблюдаемым полем, а z – характеристикой среды. По известной характеристике z можно получить поле $u = Az$, где A – оператор, устанавливающий функциональную связь между u и z . Обратной задачей является определение z по наблюдаемому полю u .

Такая обратная задача, как правило, относится к классу некорректно поставленных задач, так как малым изменениям u могут соответствовать сколь угодно большие изменения z . С этим явлением неустойчивости при решении обратных задач геофизики столкнулись достаточно давно, по существу уже на начальном этапе развития этой науки. Однако ни сущность этого явления, ни его масштабы и пути его преодоления не были по-настоящему ясны. Только после работ А.Н. Тихонова стало ясно:

- 1) явление неустойчивости решений типично для любых обратных задач;
- 2) без использования специальных (регулярных) методов эти задачи практически не решаются;
- 3) построение приближенных решений обратных задач должно строиться на основе учета априорной информации о свойствах искомого решения и ошибках в наблюдаемых данных (помехи) и быть согласованным с этой информацией.

Эти идеи с успехом использовали в МГУ при решении обратных задач электроразведки. В настоящее время эта концепция освоена широкими кругами специалистов и является руководящей при создании автоматизированных методов машинной обработки геофизических наблюдений.



А.Г. Яковлев, М.Н. Бердичевский и В.К. Хмелевской на Александровской базе МГУ (2003)

На кафедре геофизики геологического факультета МГУ большое внимание уделяется полевым практикам. С 1992-го года практики по глубинной, а с 1997-го года и по малоглубинной электроразведке проводятся на Александровской базе геофизических практик геологического факультета МГУ. Она располагается в д. Александровка Юхновского района Калужской области, примерно в 250 км к юго-западу от Москвы. На базе за счёт спонсоров, выпускников кафедры геофизики (основной из них – А.Г. Яковлев), создана вся необходимая инфраструктура для проживания и работы до 50 студентов и 20 сотрудников. Она включает четыре основных корпуса с жилыми комнатами, камеральными помещениями, библиотекой, музеем, столовой и складами, а также обсерваторский павильон, баню, летние домики, автономный генератор, средства связи (телефон, Интернет).

В рамках проектов развития МГУ пробурена, с полным отбором керна, 300-метровая скважина и приобретена каротажная аппаратура, а также аппаратура для непрерывного мониторинга геофизических полей. Компаниями «Северо-Запад» и «Геоскан-М» предоставляется аппаратура для работы более чем десятью методами электроразведки. Ежегодно, летом и зимой, на Александровской базе проходят геофизическую практику

студенты МГУ, РГГРУ (бывший МГРИ) и университета «Дубна». Также здесь проводятся школы-семинары для специалистов и молодых учёных.

В ходе учебных практик решается целый ряд практических задач, таких как выявление зон пиритизации, картирование палеодолин, изучение гидрогеологических режимов рек Угра и Воря, исследование археологических объектов (городище «Александровка» и другие), картирование подземных коммуникаций базы. Глубинные электромагнитные зондирования в основном проводятся для изучения изменений осадочного чехла при переходе от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе, а также для исследования проводящих зон в консолидированной земной коре, выявленных в районе мощной Барятинской аномалии магнитного поля Земли.



Преподаватели учебной практики по электроразведке на Александровской базе МГУ (2005)

Помимо учебных, студенты-геофизики МГУ проходят три производственные практики. Они организуются на базе компаний «Северо-Запад», «Геоскан-М» и других. В ходе практик решаются поисково-разведочные задачи по изучению месторождений углеводородов и твёрдых полезных ископаемых, а также инженерно-геологические, гидрогеологические, геоэкологические, археологические и другие задачи.

В декабре 2010 году при геологическом факультете МГУ был создан научно-образовательный центр «Геофизика в геознергетике». Тематика его работы будет связана как с поиском и разведкой месторождений традиционных источников энергии (углеводородной, атомной), так и, в большей степени, с изучением внутреннего тепла земли, причём как в тектонически активных зонах (геотермальная энергия), так и в стабильных платформенных областях (петротермальная энергия).

Список литературы

1. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом теллурических токов. Москва, ГОСТОПТЕХИЗДАТ, 1960.
2. Бердичевский М.Н. Электроразведка методом магнитотеллурического профилирования. Москва, Недра, 1968.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. Москва, Недра, 1992.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. Москва, Диалог-МГУ, 1997.
5. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва, Научный мир, 2009.

6. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. Москва, Недра, 1981.
7. Ваньян Л.Л., Бобровников Л.З. Электроразведка по методу становления магнитного поля. Москва, ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1963.
8. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. Москва, Недра, 1965.
9. Ваньян Л.Л., Дебабов А.С., Юдин М.Н. Интерпретация данных магнитотеллурических зондирований неоднородных сред. 1984.
10. Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. Москва, Наука, 1983.
11. Дмитриев В.И. Электромагнитные поля в неоднородных средах. Москва, Издательство МГУ, 1969.
12. Дмитриев В.И., Захаров Е.В. Метод интегральных уравнений в вычислительной электродинамике. Москва, МАКС Пресс, 2008.
13. Жданов М.С. Электроразведка. Москва, Недра, 1986.
14. Заборовский А.И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. Москва, Издательство МГУ, 1960.
15. Заборовский А.И. Электроразведка. Москва, ГОСГОПТЕХИЗДАТ, 1943.
16. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. Москва, Недра, 1990.
17. Работы А.Н. Тихонова по математической геофизике. Отв. ред. В.И. Дмитриев. Москва, ОИФЗ РАН, 1999.
18. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. Москва, Наука, 1986.
19. Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки. Москва, Издательство МГУ, 1970 (ч. 1), 1971 (ч. 2), 1975 (ч. 3).
20. Хмелевской В.К. Электроразведка. Москва, Издательство МГУ, 1984.
21. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К.Хмелевского и В.А. Шевнина. Москва, Издательство МГУ, 1994.
22. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Под ред. Хмелевского В.К., Модина И.Н., Яковлева А.Г. Москва, Издательство ГЕРС, 2005.
23. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Magnetotellurics in the context of the theory of ill-posed problems. Tulsa, SEG, 2002.
24. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. Berlin, Springer, 2008.
25. Berdichevsky M.N., Zhdanov M.S. Advanced theory of deep geomagnetic sounding. Amsterdam-Oxford-NewYork-Tokyo, Elsevier, 1984.
26. Zhdanov M.S. Geophysical electromagnetic theory and methods. Amsterdam-NewYork-Tokyo, Elsevier, 2009.