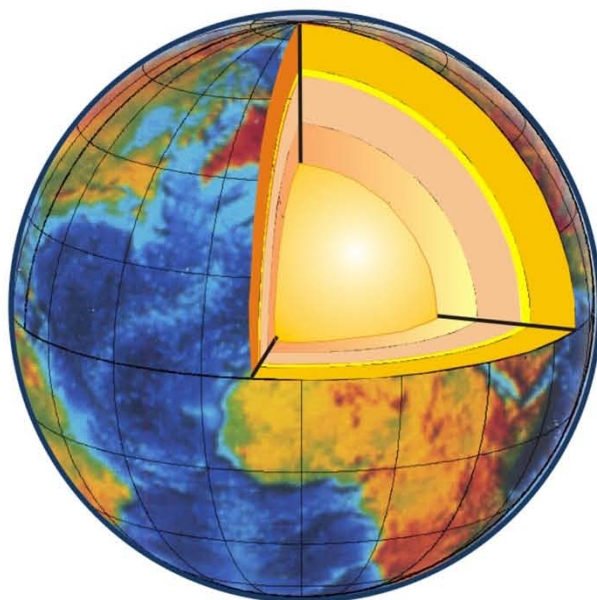


**ФИЦ КНЦ РАН
Геологический институт
РФФИ**

**Сборник тезисов II Всероссийского
(с международным участием)
научно-практического семинара**



**Квази-3D модель электропроводности, температуры
и реологии литосферы восточной части
Балтийского щита по результатам
электромагнитных зондирований с естественными
и мощными контролируруемыми источниками**

ФИЦ КНЦ РАН
Геологический институт
РФФИ

**КВАЗИ-3D МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ И
РЕОЛОГИИ ЛИТОСФЕРЫ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО
ЩИТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ
С ЕСТЕСТВЕННЫМИ И МОЩНЫМИ КОНТРОЛИРУЕМЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ**

Сборник тезисов II Всероссийского
(с международным участием)
научно-практического семинара
16-21 апреля 2018 г.

Ответственный редактор
А.А. Жамалетдинов

Апатиты
2018

«Квази-3D модель электропроводности, температуры и реологии литосферы восточной части Балтийского щита по результатам электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируруемыми источниками» Сборник тезисов II Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара. Апатиты, 16-21 апреля 2018 г. / Гл. ред. А.А. Жамалетдинов. – Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2018 – 60 с.

Сборник содержит краткие тезисы докладов, представленных на II Всероссийском (с международным участием) научно-практическом семинаре, посвященном проблеме комплексного изучения электропроводности, температуры и реологии литосферы восточной части Балтийского щита на основе электромагнитных зондирований. Тезисы собраны по пяти разделам. В первом разделе представлены доклады, посвященные теоретическим и экспериментальным методам расчета температурных и реологических параметров континентальной литосферы на основе геоэлектромагнитных и петрофизических данных. Второй раздел включает доклады по прямым и обратным задачам электромагнитных зондирований с контролируруемыми источниками, а в третьем разделе основное внимание уделено зондированиям с естественными источниками. В четвертом разделе рассмотрены вопросы методики и техники возбуждения, регистрации и обработки электромагнитных сигналов с применением естественных и мощных контролируемых источников. Заключительный пятый раздел является итоговым. В нем приведены доклады, посвященные рассмотрению методики и техники двух экспериментов «Мурман-2018» и «FENICS-2019», намеченных для выполнения по гранту РФФИ 128-05-00528. Целью экспериментов является проверка экспериментальных сведений о характере и природе геофизических границ, частично рассмотренных на семинаре, и получение новых данных.

Научная сессия прошла при финансовой поддержке РФФИ, грант №: 18-05-00528

Печатается по постановлению Ученого совета Геологического института КНЦ РАН

Главный редактор: д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинов

Рецензенты: д.т.н. А.А. Козырев, д.ф.-м.н. В.Т. Филатова

Председатель редакционной коллегии: д.г.-м.н. Н.Е. Козлов

Члены редакционной коллегии: к.ф.-м.н. Ив.М. Варенцов, д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинов (отв. ред.), к.т.н. В.В. Колобов, Т.Г. Короткова (секретарь), д.ф.-м.н., проф. Ю.Л. Ребецкий, к.ф.-м.н. А.Н. Шевцов

Компьютерный дизайн: Л.Д. Чистякова, Н.А. Мансурова

Электронная версия: <http://geoksc.apatity.ru/publications/conferences>

Предисловие от редактора

Глубинные и сверхглубокие электромагнитные зондирования с мощными контролируемыми источниками в комплексе с магнитотеллурическими и аудиоманнитотеллурическими зондированиями открыли новые возможности изучения тонкой структуры электропроводности литосферы на глубинах от единиц и десятков до первых сотен километров. Это, в свою очередь, позволило более надежно оценивать температуру земных недр и, как следствие, ее реологические параметры. Настоящий сборник посвящен первым результатам исследований в этом направлении. Он содержит тезисы докладов, представленных на научно-практическом семинаре «Квази-3D модель электропроводности, температуры и реологии литосферы восточной части Балтийского щита по результатам электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируемыми источниками». Тезисы распределены по пяти разделам. В первом разделе приведены доклады, посвященные теоретическим и экспериментальным методам расчета температурных и реологических параметров континентальной литосферы на основе геоэлектромагнитных и петрофизических данных. Рассмотрены вопросы сверхглубокого бурения и моделирования напряженно-деформированного состояния сред с различными геомеханическими и реологическими параметрами. Второй раздел включает доклады по прямым и обратным задачам электромагнитных зондирований с контролируемыми источниками, а в третьем разделе основное внимание уделено зондированиям с естественными источниками. В четвертом разделе рассмотрены вопросы методики и техники возбуждения, регистрации и обработки электромагнитных сигналов с применением естественных и мощных контролируемых источников. Особое внимание, уделенное расчетно-теоретическим вопросам интерпретации результатов электромагнитных зондирований, а также технике и методике регистрации и обработки электромагнитных сигналов, объясняется общей направленностью семинара на разработку современных концепций для проведения новых экспериментальных работ. В этом отношении заключительный пятый раздел сборника является итоговым. В нем приведены доклады, посвященные рассмотрению методики и техники двух экспериментов

«Мурман-2018 » и «FENICS-2019», намеченных для выполнения по гранту РФФИ 128-05-00528 . Целью экспериментов является проверка экспериментальных данных о характере и природе геофизических границ, частично рассмотренных на семинаре, и получение новых данных.

Сборник издается при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-05-00528

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ОТ РЕДАКТОРА	3
РАЗДЕЛ 1	
Теоретические и экспериментальные методы расчета температурных и реологических параметров континентальной литосферы на основе геоэлектромагнитных и петрофизических данных	
<i>Академик РАН А.Н. Виноградов.</i> От глубинной электропроводности к реологии литосферы Фенноскандинавского щита - от МГД-эксперимента «Хибины» к ЛЭП-эксперименту «FENICS»	9
<i>Жамалетдинов А.А.</i> О параметрах границы перехода между хрупким и пластичным состояниями земной коры.	10
<i>Шаров Н.В.</i> Сверхглубокое бурение и его влияние на сейсмические модели Фенноскандинавского щита	12
<i>Шевцов А.Н.</i> Расчет температурных параметров литосферы по данным глубинной геоэлектрики	13
<i>Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л.</i> Моделирование напряженно-деформированного состояния сред с различными геомеханическими и реологическими параметрами в приложении к задачам региональной геодинамики....	15
РАЗДЕЛ 2	
Прямые и обратные задачи частотных электромагнитных зондирований в поле контролируемых источников (промышленные ЛЭП и др.)	
<i>Шевцов А.Н.</i> Прямые и обратные задачи аудиоманнитотеллурического зондирования с контролируемым источником (CSAMT)... ..	18
<i>Петрищев М.С., Семёнов В.Ю.</i> Оккам-инверсия и ее применение в решении обратной задачи в экспериментах BEAR (Фенноскандинавский щит) и НУР (Ямало-Ненецкий Автономный округ).. ..	19
<i>Жамалетдинов А.А., Скороходов А.А.</i> Подавление статических искажений путем нормировки по полному горизонтальному магнитному полю контролируемого источника.. ..	21
<i>Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н., Ковачикова С.</i> 2D и квази-3D модели строения западного склона Воронежского массива и прилегающих территорий	22
<i>Бёрнер Р., Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н.</i> Влияние аномалий магнитной проницаемости на МТ/МВ отклики, наблюдаемые на западном склоне Воронежского массива	24

РАЗДЕЛ 3**Методика и результаты глубинных электромагнитных зондирований с применением естественных и мощных контролируемых источников**

- Варенцов Ив.М., Иванов П.В., Лозовский И.Н., Бай Д., Ли С., Валья Д., Кумар С.* Геоэлектрические модели по результатам синхронных МТ/МВ зондирований вдоль профиля, пересекающего Индийский кратон, Гималаи и Восточный Тибет 27
- Ребецкий Ю.Л.* Структуры земной коры и их взаимосвязь с напряжениями в свете данных геомеханики и тектоники.. 28
- Любич В.А., Григорьев В.Ф.* Определение местоположения геоэлектрических неоднородностей в земной коре с помощью двухчастотного радиоголографического метода. 30
- Шевцов А.Н.* Совместная интерпретация результатов электромагнитного зондирования с использованием полей естественного происхождения и контролируемых источников на профиле «Уполокша-Сямозеро» (эксперимент «FENICS-2014») 31
- Скорыходов А.А.* Двухмерное АМТ моделирование строения западного фланга Печенгской структуры и восточного фланга Ладожской аномалии. 33
- Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А.* Об учете токов смещения при частотных электромагнитных зондированиях 34

РАЗДЕЛ 4**Методика и техника возбуждения, регистрации и обработки электромагнитных сигналов с применением естественных и мощных контролируемых источников**

- Колобов В.В., Баранник М.Б.* Генераторы серии «Энергия» мощностью от 2 до 200 кВт для частотного электромагнитного зондирования земной коры 37
- Колобов В.В., Баранник М.Б.* Широкодиапазонная семиканальная измерительная станция КВВН-7 38
- Скорыходов А.А., Копытенко Е.А., Самсонов Б.В.* Опыт регистрации сигналов станциями КВВН-7 и VMTU-10 в эксперименте «Ковдор-2015» по многолучевому частотному зондированию 40
- Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В.* Специфика применения промышленных ЛЭП в качестве излучателей при проведении частотных электромагнитных зондирований. 42

Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В. Электромагнитная совместимость мощных источников КНЧ поля на основе промышленных ЛЭП с объектами энергетики.....	43
Терещенко П.Е., Сергушин П.А., Григорьев В.Ф. Особенности использования вариационных и индукционных магнитометров в экстремально низкочастотном диапазоне	44
Самсонов Б.В., Копытенко Е.А. Донная станция ВЕГА-1 для морских магнитотеллурических зондирований	46
Варенцов Ив.М. Метод синхронного МТ/МВ зондирования в глубинных и приповерхностных приложениях: системы наблюдения и процедуры многоточечной обработки данных	47
Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н. Обработка данных синхронных МТ/МВ зондирований: примеры в различных приложениях.....	48

РАЗДЕЛ 5

Проект-программа экспериментов «Мурман-2018» и «FENICS-2019», планируемых для проведения по гранту РФФИ 18-05-00528 на 2018-2019 гг.

Жамалетдинов АА. Дискуссионные проблемы глубинной электропроводности Мурманского блока (обзор)..	51
Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Скороходов А.А., Колесников В.Е., Баранник М.Б., Колобов В.В., Ивонин В.В. Проект-программа эксперимента «Мурман-2018» по глубинному электромагнитному зондированию земной коры на территории Мурманского блока в частотном и дистанционном представлениях (коллективное обсуждение)	52
Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н. Основные результаты экспериментов «FENICS-2007», «FENICS-2009» и «FENICS-2014» по частотному электромагнитному зондированию с применением двух взаимно ортогональных промышленных ЛЭП (обзор)	54
Колесников В.Е. База данных эксперимента «FENICS».....	55
Жамалетдинов А.А., Ефимов Б.В., Шевцов А.Н., Баранник М.Б., Колобов В.В., Селиванов В.Н. Проект-программа эксперимента «FENICS-2019» по электромагнитному зондированию в частотном и дистанционном представлениях (мозговая атака)	57
Алфавитный список авторов.	59

РАЗДЕЛ 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

От глубинной электропроводности до реологии литосферы Фенноскандинавского щита или от МГД-эксперимента «Хибины» до ЛЭП-эксперимента «FENICS»

Виноградов А.Н.

ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты

История глубинных электромагнитных зондирований на Кольском полуострове берет начало от МГД-эксперимента «Хибины», выполненного под научным руководством академика Евгения Павловича Велихова (1974-1990 гг) [2]. Главным результатом МГД-эксперимента явилось построение «нормальной» модели электропроводности литосферы до глубин 50-70 км. Полученный результат позволил сделать вывод о том, что континентальная земная кора на всю ее мощность отличается высоким сопротивлением и является «сухой». Этот вывод резко контрастировал с господствовавшим тогда по данным магнитотеллурики представлением о том, что нижняя кора (глубже 10-20 км) отличается высокой электропроводностью. Повышение в этих работах электропроводности объясняется присутствием флюидов, образующихся в результате дегидратации горных пород [1]. Вслед за МГД-зондированием «Хибины» был выполнен ряд других экспериментов по глубинному зондированию с применением мощных контролируемых источников. Среди них эксперименты «Волга», «Зевс», «FENICS». Эти работы подтвердили первые полученные результаты эксперимента «Хибины» и, в то же время, позволили продвинуться существенно дальше в понимании природы геофизических границ континентальной коры. В качестве самостоятельной единицы выделен «SC-слой» Семенова, представляющий собой область распространения сульфидно-углеродистых электронно-проводящих пород, приуроченных к верхней толще земной коры мощностью 10-12 км. Наряду с этим выделен промежуточный проводящий слой флюидной, дилатантно-диффузионной природы («ДД-слой») в интервале глубин от 1-2 до 7-10 км. Природа «ДД-слоя» объясняется проникновением на глубину метеорных вод вдоль литрических зон разломов и трещин. Присутствие свободных флюидов на этих глубинах объясняется явлением дилатансии – необратимым раскрытием микротрещин в условиях взаимодействия тангенциального и литостатического давлений. Одним из важнейших результатов эксперимента FENICS явилось установление высокой горизонтальной однородности нижней толщи земной коры, наряду с ее высоким сопротивлением.

Прецизионное изучение глубинной электропроводности позволило перейти к изучению температурных параметров земной коры и выполнить экстраполяцию геотермических данных Кольской сверхглубокой скважины вплоть до границы Мохо. Исследования температуры, в свою очередь, позволили перейти к оценкам реологических параметров литосферы – то есть к оценкам вязкости и пластичности пород на глубине, а отсюда и к оценкам глубинного геодинамического режима земных недр [3]. Настоящий семинар является первым шагом на пути этих исследований.

Список литературы

1. Ваньян Л.Л., Хиндман Р.Д. О природе электропроводности консолидированной коры. Изв-во: РАН, 1996. Физика Земли. № 4. С. 5-11.
2. Велихов Е.П. Геоэлектрические исследования с мощным источником тока на Балтийском щите. М.: Наука, 1989. 272 с.
3. Zhamaletdinov *et al.* Study of Interaction of ELF–ULF Range (0.1–200 Hz) Electromagnetic Waves with the Earth’s Crust and the Ionosphere in the Field of Industrial Power Transmission Lines (FENICS Experiment). ISSN 0001_4338, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015. V. 51, No. 8. P. 826-857.

О параметрах границы перехода между хрупким и пластичным состояниями земной коры

Жамалетдинов А.А.

ГИ КНЦ РАН, Апатиты, abd.zham@mail.ru

Идею о хрупком состоянии земной коры первым начал развивать академик М.А. Садовский в своих работах, посвященных проблеме «кусковатости» земной коры. Кусковатость он рассматривал как многомерную отдельность структурных звеньев земной коры по типу самоподобных фрактальных структур. Эта идея нашла свое продолжение в последующих работах, посвященных анализу результатов сейсморазведки, гравитационных и магнитных данных, напряженно-деформированного состояния среды и др. В общем итоге сложилось представление о двухслойном строении земной коры, состоящей из верхнего, хрупкого слоя («brittle layer») мощностью 10-20 км и нижнего квазипластичного слоя («ductile», «semi-ductile» layer) мощностью 20-30 км. Эти идеи находят подтверждение и в результатах сейсмологии.

В области геоэлектрики гипотеза о двухслойном делении земной коры впервые разработана на основе МГД-эксперимента «Хибины» [1]. Верхний слой имеет мощность порядка 10-12 км, а его среднее сопротивление не превышает 10^4 Ом·м. Он состоит из переотложенных метаморфизованных, первично осадочных и вулканогенных пород пестрого состава – от гнейсо-гранитов до вулканитов и метапсаммитов. Он определяется как «supercrustal layer» и залегает на поверхности древнейшего протофундаментa («protobasement»), образовавшегося на более раннем, «нуклеарном» этапе развития Земли. Его среднее сопротивление на 1-2 порядка выше и составляет 10^5 - 10^6 Ом·м.

В дальнейшем от описанной выше «геологической» трактовки двухслойной модели электропроводности земной коры пришлось отказаться в пользу физической модели, предполагающей ее подразделение на хрупкую и пластичную толщи. Однако элементы преемственности между этими моделями сохранились. В частности, основным показателем ограниченной мощности протоплатформенного (хрупкого) слоя явились так называемые «токопроводящие» каналы (ТК), представленные электронно-проводящими сульфидно-углеродистыми породами. Мощность ТК на глубину не превышает 10 км.

Наконец, важным экспериментальным подтверждением существования резкой границы перехода между верхней «хрупкой» и нижней «квазипластичной» корой явились результаты бурения Кольской сверхглубокой скважины. Вплоть до глубины 12.6 км в разрезе Кольской СГ-3 не установлено ожидавшегося изменения химизма горных пород от силикатных пород к магнезиальным. В то же время, все четыре попытки Кольской СГ-3 преодолеть глубину ~12 км в каждом случае заканчивались авариями бурового инструмента вследствие резкого увеличения прочности горных пород и невозможности продолжать бурение. Таким образом, граница непроницаемости, устанавливаемая по данным геоэлектрики, совпала с границей непреодолимости по данным сверхглубокого бурения и с границей между хрупким и пластичным состояниями вещества земной коры.

Список литературы

1. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируруемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука., 1990. 159 с.

Сверхглубокое бурение и его влияние на сейсмические модели Фенноскандинавского щита

Шаров Н.В.

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск,
sharov@krc.karelia.ru

В докладе сделана попытка понять природу сейсмических границ в кристаллической коре с учетом материалов глубокого бурения и накопленной геолого-геофизической информации по району бурения этих скважин. Проанализированы результаты бурения глубоких скважин на территории Фенноскандинавского щита: Кольской, Россия (SG-3) до глубины 12262 м (1970-1990 гг.); Гравберг (GR) и Штенберг в Центральной Швеции до глубины 6337 м (1986-1987 гг.); и 6529 м (1991-1992 гг.); Оутокумпу (OU) в юго-восточной Финляндии до глубины 2516 м (2004- 2005 гг.); Пограничная (P-1), Россия в Мурманской области на полуострове Средний, до глубины 5200 м (2004-2006 гг.); Онежской (ON), Россия в Центральной Карелии, до глубины 3537 м (2007-2008 гг.), которые выявили серьезные несоответствия между прогнозными сейсмогеологическими моделями и фактическим строением верхней части континентальной коры. Глубокие скважины доказали, что неоднородности, фиксируемые по геофизическим данным в верхней части кристаллической коры, обусловлены изменениями не только состава глубинных пород, но и их физического состояния. Поэтому определение даже приближенного состава пород по значениям только скорости упругих волн не может быть однозначным. Они показали реальность и природу зон пониженной скорости упругих волн в верхней части коры, не подтвердили увеличения гомогенности слоев с глубиной. Природа внутрикоровых сейсмических границ может быть обусловлена различными причинами: изменением вещественного состава, различием в структурно-текстурных особенностях пород и термодинамических обстановок и др.[1].

При глубинном бурении получили прямые данные о составе и строении верхней части кристаллической коры до 12 км, которые показали, что мы ничего не знаем о континентальной коре. Они заставили в значительной мере изменить представления, существовавшие раньше. Результаты геофизических исследований при бурении глубоких скважин на Фенноскандинавском щите заставляют исследователей по-другому относиться к интерпретации геолого-геофизических данных. Только результаты буре-

ния глубоких скважин в кристаллической коре позволяют получить сведения о вещественном составе пород и петрофизических характеристиках, что способствует построению объективного геолого-геофизического разреза верхней части земной коры.

Список литературы

1. Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017, 173 с.

Расчет температурных параметров литосферы по данным глубинной геоэлектрики

Шевцов А.Н.

ГИ КНЦ РАН, Апатиты, anshev2009-01@rambler.ru

Проблема получения температурных оценок литосферы на основе данных о ее электропроводности и электрических свойств горных пород при высоких термодинамических параметрах развивается с 60-х годов прошлого столетия [1]. Данные об электропроводности горных пород представляют интерес не только с точки зрения возможности оценки температуры горных пород на глубине, но и с возможностью оценить по электропроводности такие характеристики как пористость (трещиноватость), влагонасыщенность, вязкость и пластичность, вызванную приближением к зоне частичного плавления [2].

Исследования глубинного распределения электропроводности относительно однородных в горизонтальном направлении блоков земной коры выполненные на территории Фенноскандинавского щита в Карелии и на Кольском полуострове выявили ряд характерных особенностей. Наиболее существенными из них являются расхождения между кривыми зависимости кажущегося удельного сопротивления от периода, полученными для юго-западной части исследуемого района и более низкоомными кривыми в северо-восточной области. На Кольском полуострове в относительно однородных плохопроводящих блоках докембрийских участков земной коры кривые кажущегося сопротивления характеризуются в целом еще более высокими значениями, и имеют форму подобную форме кривых, полученных в Карелии. Расхождение между значениями кажущегося сопротивления высокоомных («нормальных») кривых и низкоом-

ных («аномальных») максимально в среднем диапазоне периодов 0.1-10 с и может достигать более чем полпорядка по величине. Такое расхождение кривых может быть обусловлено целым рядом факторов – различием в вещественном составе, различием в насыщенности горных пород флюидами в верхней части разреза, и разными температурными профилями в точках наблюдений.

Предположим, что на кристаллическом щите флюиды метеорного происхождения насыщают горные породы лишь на глубину до 10 км в дилатантно-диффузионной области (на больших глубинах флюиды в горных породах отсутствуют благодаря отжиманию за счет литостатического давления). Будем считать, что минеральный состав плохопроводящих однородных в горизонтальном направлении блоков земной коры в среднем одинаков на всем щите. Тогда расхождение кривых кажущегося сопротивления может быть объяснено только различием в температурном режиме. Таким образом, электрическое удельное сопротивление (электропроводность) является индикатором температуры горной породы данного состава, задавая который можно построить по полученным геоэлектрическим разрезам зависимость от глубины таких параметров как температура, пористость и др. В работе представлен алгоритм пересчета удельного сопротивления пород в значения температуры для заданного состава горных пород. Получены оценки температуры для «нормальных» (высокоомных) и «аномальных» (низкоомных) областей докембрийских плохопроводящих блоков земной коры.

Список литературы

1. Ваньян Л.Л., М.Н. Бердичевский, П.Ю. Пушкарев. Астеносфера в свете магнитотеллурических данных. Изд-во: Вестник ОГГГГН РАН, 2001. № 2 (17). С. 1-15.
2. Ковтун А.А. Физические свойства Земли по данным глубинной геоэлектрики // Вопросы геофизики. Вып. 42 (Ученые записки СПбГУ; № 442). Изд-во: СПб. ун-та, 2009. С. 84-104.

Моделирование напряженно-деформированного состояния сред с различными геомеханическими и реологическими параметрами в приложении к задачам региональной геодинамики

Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, dsm@ifz.ru

В данной работе представлены результаты численного моделирования формирования напряженно-деформированного состояния (НДС), полученные как для региональных геодинамических и для локальных геомеханических моделей. К первой группе относится модель формирования напряженно-деформированного состояния в зоне субдукции области Тахоку.

Исследование НДС в зоне субдукции области Тахоку проводилось методом численного моделирования. Применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел и усовершенствованная Стефановым [3] для применения в геомеханике. Целью работы является определение геодинамических факторов, ответственных за формирование напряженного состояния литосферы зоны субдукции региона Тохоку (северное Хонсю) на стадии, непосредственно предшествовавшей катастрофическому землетрясению Тохоку (2011). По данным тектонофизических реконструкций, в указанной области наблюдалась следующая закономерность: в литосфере Японского микроконтинента и в океанической литосфере, субдуцирующей под Хонсю (к Западу от тальвега жёлоба) наблюдается обстановка латерального сжатия, тогда как к востоку от жёлоба наблюдается противоположная обстановка – латерального растяжения. Такая закономерность требует геодинамического объяснения, попытка поиска которого была произведена в рамках текущей работы методом численного моделирования. Рассматриваются модели напряженно-деформированного состояния региона, формирующегося за счёт действия мелкомасштабной астеносферной конвекции, латерального давления со стороны тихоокеанской плиты. Отдельно изучается действие экзогенных процессов (денудации и аккумуляции геоматериала). Применяемая методика рассматривает тела модели как упруго-пластические. В классическом подходе Уилкинса предлагается схема, где берётся условие текучести в форме Мизеса, в данном же подходе берётся более сложная и подходящая для геосреды модифицированная модель Друккера-Прагера-Николаевского [1, 2]. В её рамках среда рассматривает-

ся как упрочняющееся упругопластическое тело, используется неассоциированный закон пластического течения.

В работе представлены также результаты моделирования НДС близ активной трещины в среде, находящейся в закритическом состоянии. Показана принципиально различающаяся картина затухания параметров НДС при удалении от трещины для данного случая и случая, когда среда изначально не находится в закритическом состоянии, а лишь формирует зоны пластичности близ концевых участков трещины. Моделирование проводилось тем же методом, что и для вышеописанных моделей.

Список литературы

1. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир. 1975. С. 166-177.
2. Николаевский В.Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Механика твердых деформируемых тел. Т. 6. Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ АН СССР. 1972. С. 5-85.
3. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 3. С. 129-142.

РАЗДЕЛ 2

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ПОЛЕ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ (ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЛЭП И ДР.)

Прямые и обратные задачи аудиоманнитотеллурического зондирования с контролируемым источником (CSAMT)

Шевцов А.Н.

ГИ КНЦ РАН, Апатиты, anshev2009-01@rambler.ru

В настоящее время электромагнитные исследования Земли осуществляются, в основном, с использованием естественного поля с помощью аудиоманнитотеллурических (АМТ) и магнитотеллурических (МТ) методов. Значительная часть этих работ успешно выполняется в условиях высокой и повышенной электропроводностью горных пород, выходящих на дневную поверхность (от единиц до десятков и первых сотен омметров).

Качество данных для АМТ и МТ зависит от случайно распределенных источников естественного поля. Наличие АМТ сигнала зависит от сезона, времени суток и состояния атмосферы. В условиях авроральной зоны и подстилающего разреза с большими значениями удельного сопротивления (10^4 - 10^5 Ом·м), высокий уровень помех приводит к расширению области эквивалентности и, соответственно, неоднозначности получаемых результатов интерпретации. Для борьбы с этими факторами выполняются длительные наблюдения (до нескольких суток) и применяются специальные статистические методы. Другой способ повысить качество получаемых данных – использовать контролируемые искусственные источники переменного поля – методы частотного зондирования (ЧЗ) и АМТ с контролируемым источником (CSAMT). При этом получают более точные данные (местоположение и время действия источника, частота, амплитуда силы тока в источнике, поляризация первичного поля), но частотный диапазон пригодный для интерпретации оказывается ограниченным возможностями генераторно-излучающих устройств и влиянием ближней зоны источника. Интерпретация усложняется необходимостью использования более сложных алгоритмов решения прямой задачи, учитывающих неоднородность первичного поля источника.

Наиболее общее теоретическое решение прямой задачи для горизонтально-слоистых моделей с учетом влияния токов смещения для произвольно ориентированных точечных дипольных источников электрического и магнитного типа, приведено в работе. Эти представления наряду со способами численного интегрирования преобразования Фурье-Бесселя позволили разработать эффективный алгоритм решения прямой зада-

чи частотного зондирования для одномерных моделей горизонтально-слоистой среды.

Современные алгоритмы решения прямой задачи для двумерных и трехмерных моделей среды строятся на основе метода интегральных уравнений, сеточных конечно-разностных или конечно-элементных способов решения системы уравнений Максвелла. Большой скачек развития методы решения прямой задачи получили благодаря применению алгоритмов распараллеленных вычислений на многоядерных вычислительных комплексах и суперкомпьютерах.

Интерпретации данных CSAMT посвящено большое число работ. Разрабатываемые алгоритмы не являются универсальными и требуют значительных усилий интерпретатора как при подготовке данных для инверсии, так и при анализе получаемых результатов. В связи с этим развитие получили методы построения квази-трехмерных моделей по результатам одномерной и двумерной инверсии в большом количестве точек, с последующей интерполяцией на нерегулярной трехмерной сети [1].

Список литературы

1. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С. Квазитрехмерная модель электропроводности литосферы Фенноскандинавского щита по результатам экспериментов BEAR И FENICS // ДАН, 2015. Т. 463. № 3. С. 1-6.
2. Шевцов А.Н. Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита // Диссер.на соискание ученой степени к.ф.-м.н. СПбГУ, 2001. 99 с.

Оккам-инверсия и ее применение в решении обратной задачи в экспериментах BEAR (Фенноскандинавский щит) и НУР (Ямало-Ненецкий Автономный округ)

Петрищев М.С.¹, Семёнов В.Ю.²

¹ СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, ms_petr@mail.ru

² Институт геофизики Польской академии наук, Варшава, Польша, sem@igf.edu.pl

В работе представлен опыт решения обратной задачи данных электромагнитных зондирований методом ОССАМ по материалам экспериментов BEAR и НУР-2011 и НУР-2012. Эксперимент BEAR (Baltic Electromagnetic

Array Research) проведен в июне-июле 1998 года. Он выполнен путем синхронного магнитотеллурического зондирования с применением 50 станций, разнесенных по сети 150×150 км на территории Фенноскандинавского щита в Швеции, Финляндии и в России [2]. Результаты эксперимента имеют широкий разброс значений кажущегося сопротивления, охватывающий почти 5 порядков – от десятых долей до сотен тысяч омметров. Вторая особенность заключается в том, что фазовые кривые эффективного импеданса располагаются довольно компактно с разбросом 20-25 градусов и хорошо согласуются с обобщенными результатами фазовых измерений в поле контролируемых источников и глобальных магнитовариационных данных. Это позволило применить ОССАМ-инверсию как эффективный инструмент нормализации результатов эксперимента. Привязка кривых кажущегося сопротивления выполнена по низкочастотной части с помощью результатов магнитовариационного зондирования. В этом случае опора осуществляется на проводимость мантии Земли. Геоэлектрические разрезы по результатам инверсии имеют сходные между собой черты, близкие по форме и амплитудным значениям к нормальному разрезу, полученному по результатам эксперимента FENICS [1]. Неоднородность верхнего геоэлектрического разреза фактически исчезла. Это привело к потере части информации, но, в то же время, позволило получить более однозначную информацию о глубинном геоэлектрическом разрезе. К сожалению, фазовые кривые эксперимента во многих случаях подверглись сильным искажениям, и это ограничило возможности для применения результатов ОССАМ-инверсии для всего массива данных эксперимента.

Этот же подход применялся для решения обратной задачи результатов экспериментов НУР-2011 и НУР-2012. Эксперименты выполнены в Западной Сибири в 2011 и 2012 годах соответственно, а аббревиатура НУР является сокращением от названия города Новый Уренгой. Эксперименты выполнялись в поле естественных и контролируемого источников. Существенная ценность эксперимента заключается в том, что зондирования были выполнены вблизи сверхглубокой скважины СГ-7, по стволу которой известны данные электрического каротажа. Для уменьшения неопределенности решения обратной задачи полученные в экспериментах данные зондирования в обоих случаях дополнены откликами глубинного магнитовариационного зондирования на сверхдлинных периодах (3 часа – 11 лет) по данным ближайшей геофизической обсерватории «Ключи» (г. Новосибирск, международный код NVS). Кривая геоэлектрического разреза, полученная в результате ОССАМ-инверсии, удовлетворительно согласуется с данными каротажа.

Список литературы

1. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Велихов Е.П. и др. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ-СНЧ диапазона (0.1-200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент «FENICS») // Геофизические процессы и биосфера. 2015. № 14(2). С. 5-49.
2. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A. *et al.* Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield // Earth Planets Space. 2002. V. 54. P. 553-558.

Подавление статических искажений путем нормировки по полному горизонтальному магнитному полю контролируемого источника

Жамалетдинов А.А., Скороходов А.А.

ГИ КНЦ РАН, Апатиты, abd.zham@mail.ru

Физическая основа статических искажений («static shift» в западной литературе) сводится к частотно-независимому шунтированию (занижению) напряженности электрического поля в том случае, если измерительные линии располагаются на поверхности локального проводника, размеры которого много меньше длины электромагнитной волны. Экспериментально изученные статические искажения впервые были описаны Н.В. Липской на примере Белорусского кратона. Теоретическое описание статических искажений и способ их качественного учета впервые был описан И.И. Рокитянским [1]. Предложенный им способ устранения статических искажений является наиболее часто применяемым, он сводится к параллельному смещению кривых кажущегося сопротивления (ρ_T) вверх по оси ординат до совмещения низкочастотных ветвей с кривой глобального магнитовариационного зондирования, свободного от влияния гальванической моды. Кроме него применяются другие способы учета, такие как метод статического усреднения кривых ρ_{ω} на большом пространстве исследований, метод привязки высокочастотных ветвей кривых МТЗ к результатам зондирования с контролируемыми источниками и др. Но все эти приемы являются качественными - их надежность определяется интуицией интерпретатора. В настоящей работе предложен метод количественной оценки статических искажений путем привязки (нормировки) кривых кажущегося сопротивления, измеренных по электрическому полю или по

входному импедансу, к кривым кажущегося удельного сопротивления, измеренным по полному горизонтальному магнитному полю контролируемого источника.

Поскольку датчики горизонтального магнитного поля гальванически не связаны с землей, то значения определяемого по ним кажущегося удельного электрического сопротивления свободны от влияния локальных проводников, расположенных в приповерхностной зоне, и наиболее точно отражают свойства слоистого нижнего полупространства. Решение этой задачи возможно при соблюдении, по крайней мере, двух условий – (а) измерения должны проводиться в поле контролируемого источника и (б) измерения магнитного поля должны выполняться в условиях квазистационарной волновой зоны.

Расчёт кажущегося удельного сопротивления проводится по следующим формулам:

$$\rho_{tot}^H = 2\pi f \cdot \mu_0 \cdot \left(K_{tot}^H \cdot \frac{H_{tot}}{I \cdot L_{AB}} \right)^2, \text{ где } H_{tot} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$$

$$K_{tot}^H = \frac{K_x^H \cdot K_y^H}{\sqrt{(K_x^H)^2 + (K_y^H)^2}}, \text{ где } K_x^H = \left(\frac{2\pi \cdot r^3}{3 \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta} \right)^2, K_y^H = \left(\frac{2\pi \cdot r^3}{3 \cos^2\theta - 2} \right)^2$$

Практические примеры применения описанного способа учета статических искажений при обработке результатов частотных зондирований с контролируемыми источниками в комплексе с МТЗ описаны в основном тексте доклада на примере эксперимента «Ковдор-2015».

Список литературы

1. Рокитянский И.И. Глубинные магнитотеллурические зондирования при наличии искажений от горизонтальных неоднородностей // Геофиз. сб. Киев. Изд-во: Наукова думка, 1971. Вып. 43. С. 71-78.

2D и квази-3D геоэлектрические модели на западном склоне Воронежского массива и прилегающих территориях

Варенцов Ив.М.¹, Ковачикова С.², Лозовский И.Н.¹

¹ ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Троицк, ivan_varentsov@mail.ru

² Геофизический институт Чешской АН, Прага

В рамках международного проекта KIROVOGRAD с участием ученых России, Украины, Белоруссии и Чехии на западном склоне Воронеж-

ского массива, в Днепровско-Донецкой впадине и на прилегающей части Украинского щита в 2007-2015 г. было выполнено более 220 синхронных МТ/МВ зондирований [1-3]. Использование МВ наблюдений в геомагнитной обсерватории KIV (Киев) и стационарном пункте ALX (д. Александровка, Калужская обл.) позволило провести по единой методике [3] многоточечное оценивание импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика для периодов до 4096 с, обеспечивающее подавление интенсивных промышленных помех и глубинность исследований до 100 км. В более широкой области, охватывающей весь Воронежский массив и прилегающие осадочные бассейны, собраны результаты более 200 предшествующих локальных зондирований (импедансы и типперы) и дана новая, уточненная оценка приповерхностной (осадочной) продольной проводимости [4].

Совместная квази-3D инверсия данных типпера и горизонтального МВ отклика на периодах 200-3600 с в многопленочной модели с фиксированным приповерхностным и оптимизируемым глубинным распределением продольной проводимости позволило отчетливо проследить в плане положение трех ярких (уровня 2000-5000 См, с шириной в десятки км) коровые аномалии электропроводности – Кировоградскую, продолжающуюся с Украинского щита, на ЮЗ, Курскую, совпадающую с КМА, на ЮВ и Кирово-Барятинскую к северу от Курской.

Совместная 2D+ инверсия данных импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика [6] вдоль северных профилей КИРОВ, ЖИЗДРА и БРЯНСК с умеренной трехмерностью данных позволяет определить глубину наиболее проводящих коровых структур в пределах 20-30 км [2, 3] с трендом ее увеличения с севера на юг. Их природа связывается с присутствием протерозойских толщ графитизированных метаосадков [2, 3].

На профилях южнее Брянска возможности 2D+ интерпретации ограничены повышенной трехмерностью данных, тем не менее, получаемые здесь модели допускают продолжение коровых проводящих структур в литосферную мантию (ниже 45 км) и позволяют обсуждать возможность присутствия в ней проводящих флюидов, связанных с современными процессами платформенной активизации [2].

Список литературы

1. Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А. и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013. № 2. С. 32-38.
2. Варенцов Ив.М., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. и др. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос. 2013. 118 с.

3. Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др. Синхронные МТ и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 90-107.
4. Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Лозовский И.Н. Развитие методики квази-3D инверсии МВ данных // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 44-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. М: ИФЗРАН. 2017. С. 84-89.

Влияние аномалий магнитной проницаемости на МТ/МВ отклики, наблюдаемые на западном склоне Воронежского массива

Бёрнер Р.-У.¹, Варенцов Ив.М.², Лозовский И.Н.²

¹ Горная академия, Фрайберг, Германия

² ЦГЭМИ Института физики Земли РАН, Москва, Троицк
i.n.lozovsky@gmail.com

Коровые проводящие аномалии, выявленные по МТ/МВ данным в рамках международного проекта KIROVOGRAD, в плане совпадают, в своем большинстве, с источниками аномалий постоянного магнитного поля (КМА и Баятинской). На детально изученном профиле ЖИЗДРА магнитные источники – массивы железистых кварцитов – лежат в верхней части фундамента на глубине первых км над периферийными частями коровых проводников, выделяемых на глубинах 20-30 км. Источники магнитных аномалий характеризуются значениями магнитной проницаемости, в разы превышающими проницаемость вакуума, традиционно используемую для всей среды при моделировании и инверсии МТ/МВ данных. Для оценки возможных интерпретационных искажений в окрестности магнитных источников необходимо выполнить имитационное моделирование влияния аномалий магнитной проницаемости на МТ/МВ отклики для достаточно сложных геоэлектрических структур, характерных для Воронежского массива. Известные результаты 2D моделирования для ограниченного набора тел простой формы не позволяют надежно получить необходимые оценки.

Представляются новые результаты моделирования в 2D приближении, полученные с помощью программы, реализующей метод конечных элементов. Выбранная имитационная модель является упрощением ито-

говой модели 2D + инверсии МТ/МВ данных на профиле ЖИЗДРА. Положение магнитных источников учитывает результаты пешеходной магнитной съемки вдоль данного профиля. Пять компонент ЭМ поля и передаточные операторы, интерпретируемые на данном профиле, рассчитаны для нескольких значений магнитной проницаемости в области источников в диапазоне от 1 до $5 \mu_0$ при фиксированной геоэлектрической структуре модели. Электрическое поле и импеданс Н-поляризации практически не зависят от рассматриваемых аномалий магнитной проницаемости. В Е-поляризации электрическое поле также меняется незначительно, но при этом магнитные отклики геоэлектрических структур заметно ослабляются непосредственно в пределах аномалий магнитной проницаемости. Соответственно, характер и масштаб искажений импеданса в данной поляризации определяется искажениями горизонтального магнитного поля.

В ходе инверсии имитированных МТ/МВ данных без учета аномалий магнитной проницаемости использование импедансных откликов в Н-поляризации не приведет к искажению глубинных геоэлектрических структур. При инверсии МТ и МВ данных в Е-поляризации модельные сопротивления будут возрастать непосредственно под аномалией магнитной проницаемости. Соответственно, в глубинной проводящей структуре возникнут слабопроводящие «разрывы». Таким образом, в рассмотренном классе моделей непосредственно под аномалиями магнитной проницаемости возможно нарушение сплошности глубинных проводящих объектов в их поперечном сечении. В трехмерной ситуации подобные нарушения возможны и вдоль простираения проводящих структур.

Для минимизации выявленных влияний в ходе многокомпонентной инверсии следует больший вес придавать импедансным данным Н-поляризации, прежде всего, фазовым и вводить латеральное сглаживание в пределах горизонтально сегментированных проводящих структур в зонах ярких аномалий постоянного магнитного поля. Заслуживает внимания разработка средств явного учета аномалий магнитной проницаемости в процедурах 2D инверсии МТ/МВ данных.

Представленные результаты получены при поддержке РФФИ в рамках гранта 16-35-00529_мол_а.

РАЗДЕЛ 3

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫХ И МОЩНЫХ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

Геоэлектрические модели по результатам синхронных МТ/МВ зондирований вдоль профиля, пересекающего Индийский кратон, Гималаи и Восточный Тибет

Варенцов Ив.М.¹, Иванов П.В.¹, Лозовский И.Н.¹, Бай Д.², Ли С.², Валья Д.³, Кумар С.³

¹ ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Троицк, ivan_varentsov@mail.ru

² Институт геологии и геофизики Китайской АН, Пекин

³ Северо-восточный горный университет, Шиллонг, Мегалайя, Индия

В рамках международного проекта EHS3D с участием ученых Китая, Индии, России, Украины и др. стран ведется изучение глубинной геоэлектрической структуры Восточного Тибета, Гималаев и прилегающих частей древних платформ. В 2007-16 г. Институт геологии и геофизики КАН выполнил комплексные синхронные ЭМ зондирования с длиннопериодной (LMT) аппаратурой LEMI и разведочными (BMT) инструментами Phoenix на трех геотраверсах EHS-2, 3, 4 в Восточном Тибете длиной >1000 км каждый. Синхронная обработка полученных LMT наблюдений велась по методикам ЦГЭМИ ИФЗ РАН с использованием данных нескольких китайских геомагнитных обсерваторий. Профильная интерпретация импедансных BMT данных на периодах до 1000 с выявила яркие латеральные изменения коровомантийной электропроводности, но не обеспечила вертикального разрешения аномалий. Многокомпонентная интерпретация сводных МТ/МВ данных (в диапазоне периодов 0.08-12000 с) в пунктах LMT зондирований на профиле EHS-3 позволила разделить верхнекоровые, коровомантийные и «астеносферные» проводящие структуры, однако ее разрешающая способность была ограничена недостатком данных на ЮЗ окончании профиля вблизи индийской границы.

В 2016-18 г. в СВ Индии реализована новая фаза синхронных МТ/МВ зондирований проекта EHS3D в кооперации ЦГЭМИ ИФЗ РАН и индийского Северо-восточного горного университета (Шиллонг, штат Мегалайя). В ее рамках на профиле EHS-IND, проходящем от китайской границы на ЮЗ вдоль р. Брахмапутра, выполнено ~30 глубинных зондирований с аппаратурой KMS-820 и собрана информация о десятках разведочных зондирований прошлых лет с аппаратурой Phoenix. Использование МВ наблюдений в нескольких геомагнитных обсерваториях Индии, Китая и Вьетнама позволило осуществить помехоустойчивое многоточечное оценивание импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика

для периодов от 0.5 до 4096-8192 с, обеспечивающее глубинность исследований более 200 км. Структура полученных передаточных операторов оказалась весьма сложной с существенной трехмерностью и явным изменением главных направлений на периодах, характеризующих структуры осадочного чехла, коры и верхней мантии. Тем не менее, анализ экстремальных инвариантов импеданса и горизонтального МВ отклика для зондирований в долине Брахмапутры показывает отсутствие ярких коровомантийных аномалий, характерных для большей части Восточного Тибета. Одномерные геоэлектрические разрезы, полученные здесь по эффективным инвариантам импеданса, отражают, в первую очередь, изменчивость структуры осадочного чехла и указывают на относительно высокое (в сотни Ом·м) сопротивление коровомантийных структур на глубинах до 100 км. В индийских предгорьях Гималаев результаты 1D инверсии демонстрируют умеренное возрастание коровой продольной проводимости, а в китайских пунктах зондирований по мере удаления от границы отчетливо проявляются яркие аномалии сначала на коровых, а затем и на коровомантийных глубинах, согласующиеся с 2D разрезом, полученным вдоль профиля EHS-3.

Представленные результаты исследований получены при поддержке РФФИ в рамках российско-индийского гранта 16-55-45052_ИНД_а и российско-китайского гранта 17-55-53102_ГФЕН_а.

Структуры земной коры и их взаимосвязь с напряжениями в свете данных геомеханики и тектоники

Ребецкий Ю.Л.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, reb@ifz.ru

В известной серии работ В.Н. Николаевского второй половины 70-х – начала 80-х годов прошлого века геомеханика внесла существенный вклад в развитие представлений о деформационных свойствах пород литосферы. В.Н. Николаевский предположил, что подошва коры является границей смены упруго-хрупкого поведения пород на упруго-пластическое, в котором необратимые деформации возникают за счет смещения дислокаций, дробления и скольжения вдоль границ зерен. В моем докладе будет сделано развитие его идей на основе имеющихся сегодня новых результатов геомеханических экспериментов и тектонофизических данных

о современном напряженном состоянии различных сейсмоактивных регионов.

В.Н. Николаевский полагал, что объяснение выполаживания разломов в средней коре вблизи волноводов связано с изменением ориентации осей сжатия на 90 град от субвертикального, до субгоризонтального. Новые данные геомеханических экспериментов показывают зависимость угла скалывания трещин в областях дилатансии от уровня всестороннего давления. Это позволяет объяснить изменение углов погружения разломов без таких кардинальных изменений геодинамического типа напряженного состояния.

Из данных геофизических профилей известно, что в нижней части коры имеется большое число отражающих площадок, которые связаны с явлением глобального срыва вдоль подошвы коры. Полученная в геомеханических экспериментах взаимосвязь между полосами компакци (сдвиги с уплотнением) и направлениями осевого давления позволяет дать этим площадкам иную интерпретацию. Данные площадки следует рассматривать как полосы компакци – сжатие с небольшим сдвигом, возникающие в низах коры в условиях высокого уровня вертикальных напряжений сжатия и при высоком уровне бокового стеснения.

Развивая идеи В.Н. Николаевского, а также С.Н. Иванова и И.Г. Кисина в отношении волновода в средней коре, полагаем, что резкая смена проницаемости пород, происходящая на границе верхней и нижней коры, определяет близлитостатическое флюидное давление в кровле волновода. Поскольку с глубиной это давление должно возрасти по закону гидростатики, то на подошве волновода давление флюида ниже литостатического. В нижней коре вблизи ее подошвы из-за закрытия пор и трещин флюидное давление должно приближаться к литостатике. Поэтому силы трения на трещинах приближаются к нулю, а прочность пород в низах коры стремится к их прочности сцепления. Таким образом, нижняя кора за исключением небольшого участка вблизи ее кровли обладает прочностью даже ниже, чем в волноводе. Отличие состояния нижней коры от средней (волновода) состоит в более плотной упаковке породы и меньшем объеме трещинно-порового пространства, что проявляется в повышении скорости сейсмических волн с глубиной.

Предложены уравнения, связывающие углы погружения разломов для двух разных типов геодинамических режимов (растяжения и сжатия) с величинами напряжений. Рассчитаны «конверты прочности» для режимов горизонтального сжатия и растяжения.

Определение местоположения геоэлектрических неоднородностей в земной коре с помощью двухчастотного радиоголографического метода

Любчич В.А., Григорьев В.Ф.

Полярный геофизический институт, Мурманск, lubchich@yandex.ru, valgri@pgi.ru

Радиоголографический метод является перспективным инструментом для решения задач рудной геофизики. Голографическая реконструкция геоэлектрических неоднородностей в земной коре позволяет по площадным поверхностным наблюдениям электромагнитного поля эффективно локализовать в пространстве аномальные области с повышенной электропроводностью, ассоциируемые с локальными рудными телами. Существует интегральное уравнение, связывающее голографическую реконструкцию магнитного поля \mathbf{H}_H с неизвестным распределением плотности фиктивных магнитных токов \mathbf{j}_m , являющихся источниками аномального поля:

$$\mathbf{H}_H(\mathbf{r}) = \mathbf{H}_0(\mathbf{r}) + 2i \int_V d\mathbf{r}' \mathbf{j}_m(\mathbf{r}') \text{Im} \mathbf{G}_m(\mathbf{r}, \mathbf{r}'),$$

где \mathbf{H}_0 – напряженность нормального магнитного поля, $\text{Im} \mathbf{G}$ - мнимая часть функции Грина, интегрирование ведется по области расположения аномальных источников. Сеточная аппроксимация интегрального уравнения, когда нижнее полупространство разбивается на ячейки конечного объема, позволяет перейти к системе линейных уравнений относительно неизвестных значений источников \mathbf{j}_m , определение которых и является решением обратной задачи рассеяния.

Возможности радиоголографического метода экспериментально проверены на участке Лойпишнюн Мончегорского рудного района. При анализе результатов полевых работ 2012 года была отмечена возможность появления «ложных» аномалий при голографической реконструкции распределения неоднородностей [1]. В качестве одного из способов по отбраковке таких «ложных» аномалий было предложено проведение наблюдений на нескольких частотах. В 2017 году на этом участке были проведены расширенные полевые исследования по применению двухчастотного радиоголографического метода для локализации в пространстве рудных зон.

В результате решения полученных систем линейных уравнений для сечения земной коры $Z = 300$ м были выделены две аномальные обла-

сти в пределах координат $X = 100-300$ м, $Y = 400-600$ м и $X = 600-800$ м, $Y = 200-500$ м на частоте 34 Гц и одна аномальная область в пределах координат $X = 100-300$ м, $Y = 400-600$ м на частоте 136 Гц. За начало координат выбран юго-западный угол планшета съемки. Первая аномалия имеет геологическое объяснение. В этом районе скважиной С-1720, длина ствола которой составляет 502.7 м, вскрыты рудные зоны с богатым содержанием сульфидов в интервалах глубин 218-219 м, 265-270 м, 360-365 м. Таким образом, данная аномальная область с повышенной электропроводностью соответствует местоположению рудных зон с богатой сульфидной минерализацией. Вторую аномальную область, выделенную на частоте 34 Гц, можно рассматривать как «ложную» аномалию, так как на частоте 136 Гц она не выделяется.

Результаты полевых работ показали, что двухчастотный вариант радиоголографического метода позволяет отбраковать «ложные» аномалии и выделить те аномальные зоны, которые можно ассоциировать с рудными телами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 17-45-510956 p_a).

Список литературы

1. Любич В.А. Применение радиоголографического метода при поиске локальных рудных тел // Физика Земли. 2015. № 2. С. 139-149.

Совместная интерпретация результатов электромагнитного зондирования с использованием полей естественного происхождения и контролируемых источников на профиле «Уполокша-Сямозеро» (эксперимент «FENICS-2014»)

Шевцов А.Н.

ГИ КНЦ РАН, Апатиты, anshev2009-01@rambler.ru

В методе частотного электромагнитного зондирования (частотное зондирование (ЧЗ) – в России или аудиоманнитотеллурическое зондирование с контролируемым источником (CSAMT)) используется представление о гармоническом процессе – бесконечном во времени периодическом колебании синусоидальной формы параметров электромагнитного поля обусловленных колебаниями электрического тока в источнике. При этом,

как правило, предполагаются известными основные параметры источника – его геометрия и сила тока в нем, как функция времени (гармоническая или представленная рядом гармоник [1]). Кроме того, когда используются линейные заземленные источники (электрическая диполь, длинная заземленная линия), электромагнитное поле имеет четкую эллиптическую поляризацию близкую к линейной. В то же время для обработки результатов зондирования с полями естественного происхождения (методы МТЗ-АМТЗ) приходится отказываться от этих представлений, поскольку реальный магнитотеллурический процесс не описывается моделью гармонического поля [2]. Вместо этого используется понятие стационарного стохастического процесса, удовлетворяющего условию эргодичности. Кроме того, предполагается существование линейной зависимости между компонентами поля и постоянство магнитотеллурического импеданса в узкой полосе частот.

Во время измерений методом ЧЗ (CSAMT) с широкополосными измерительными станциями наряду с регистрацией компонентов электромагнитного поля источника в диапазоне АМТ-МТ регистрируются и поля естественного происхождения, которые при обработке данных часто воспринимаются как помехи и отфильтровываются. Наоборот, в измерениях АМТ-МТ поля, часто записываются и поля известных удаленных источников КНЧ-СНЧ диапазона, при этом стандартные процедуры обработки должны их исключать как помехи искусственного происхождения. Однако оба процесса содержат информацию о Земле. И результаты интерпретации совместных измерений CSAMT и АМТ-МТ в одной и той же точке должны дополнять друг друга. С этой целью в Геологическом институте РАН разработан комплекс программ для обработки и интерпретации результатов совместных исследований частотного электромагнитного зондирования с контролируруемыми источниками и зондирования с естественными полями. Разработанные алгоритмы были впервые апробированы в ходе уникального эксперимента FENICS-2014. [3]. В работе представлены результаты углубленной обработки данных эксперимента.

Список литературы

1. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 656 с.
2. Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра, 1985. 133 с.
3. Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А., Колобов В.В., Баранник М.Б. Частотное электромагнитное зондирование с промышленными ЛЭП на Карело-Кольском геотраверсе // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 178-188.

Двухмерное АМТ моделирование строения западного фланга Печенгской структуры и восточного фланга Ладожской аномалии

Скороходов А.А.

ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, sammicne@yandex.ru

Метод аудиомагнитотеллурического зондирования (АМТЗ) является одним из самых распространенных методов геоэлектрики. Первоначально используемый для исследования горизонтально-слоистых сред, он, путем совершенствования аппаратуры, методов обработки и интерпретации, стал применяться для исследования сложных структур с целью поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, решения структурных и даже инженерных задач.

Метод АМТЗ был применен для решения структурных задач на 2-х объектах Карело-Кольского региона: западном фланге Печенгской структуры, расположенной на северо-западе Мурманской области и Янисъяврской аномалии, находящейся в пределах Ладожской аномалии электропроводности. Целью этих работ было определение углов и глубины залегания проводников, обнаруженных методами на постоянном токе. Оба объекта представляли собой вытянутую высококонтрастную по удельному сопротивлению структуру. Анализ обработанных данных АМТЗ показал, что объекты могут быть аппроксимированы двумерными моделями.

Для решения задач было применено двумерное моделирование, реализованное И.Л. Варданянц в программном пакете 2D2011, в котором для расчёта отклика АМТ-поля используется метод конечных разностей [1].

При построении моделей в обоих случаях использовались результаты профилирования на постоянном токе, показывающие распределение удельной электропроводности близ поверхности. При моделировании устанавливалось влияние углов наклона проводящих пластов, глубина их залегания и выполаживания, а также влияние анизотропии электропроводности. Также, при подборе моделей учитывалась в первую очередь Е-поляризация поля (когда вдоль оси однородности направлено электрическое поле), как отражающую глубинное распределение электропроводности. И только на последних, уточняющих стадиях учитывалась Н-поляризация, подверженная влиянию приповерхностных неоднородностей.

Результаты моделирования показали, что Янисъяврская аномалия на Ладогe, вероятно, представляет собой приповерхностный проводник,

симметричной формы, глубина которого не превышает 200 м, а сопротивление составляет единицы омметров. Данная ситуация является классическим примером влияния приповерхностного проводника на результаты АМТЗ [2].

Печенгская структура на западном фланге, согласно результатам моделирования, представляет собой чередование высококонтрастных по удельному сопротивлению слоёв, крутопадающих в юго-западном направлении и выполаживающихся на глубине порядка 2 км. Результаты АМТЗ сильно подвержены влиянию анизотропии, проявившемуся в виде сильного расхождения (на порядок и более) амплитудных кривых кажущегося сопротивления на разных поляризациях, которое не может быть объяснено простой двухмерностью среды.

Список литературы

1. Варданянц И.Л., Расчеты методом сеток магнитотеллурических полей над двумерно-неоднородными средами // Вопросы геофизики. Вып. 27. Л., 1978. С. 36-40 (часть 1); Вып. 28, Л., 1979. С. 40-50 (часть 2).
2. Бердичевский М. Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. С. 566-571.

Об учете токов смещения при частотных электромагнитных зондированиях

Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, anshev2009-01@rambler.ru

Рассмотрены особенности распространения поля гармонического электромагнитного диполя, расположенного на плоской границе раздела между двумя однородными полупространствами – воздухом, имеющим бесконечно высокое сопротивление, и проводящей землей. Распространение электромагнитного поля вблизи принято оценивать по волновому параметру $|k_e|r$, где r – расстояние между источником и точкой приема, k_e – волновое число. Величина $|k_e|r$ определяет зоны источника – ближнюю ($|k_e|r < 1$) и дальнюю, квазистационарную ($|k_e|r > 1$). В ближней зоне существуют только тороидальная магнитная мода (ТМ), создаваемая гальваническими токами, токами растекания. В дальней зоне при $|k_e|r > 1$ преобладает индукционная полоидальная мода (ПМ), в которой линии

поля имеют вид горизонтальных петель (замкнутых контуров). Принятое определение дальней зоны справедливо только в условиях квазистационарной аппроксимации, то есть при условии, что расстояние между передатчиком и приемником (r) больше, чем длина электромагнитной волны в земле (λ_e) и в то же время не превышает длину волны в воздухе (λ_0). Если расстояние между источником и приемником превышает этот предел ($r > \lambda_0$), то это означает, что поле распространяется за пределами квазистационарной аппроксимации. То есть распространяется в верхнем полупространстве в виде слабозатухающей волны, существующей какое-то время и после отключения тока в источнике. В этом случае при расчете параметров поля должно быть принято во внимание влияние верхнего полупространства, включающее в себя влияние токов смещения, наряду с токами проводимости в земле. Электромагнитное поле в волновой зоне квазистационарного приближения распространяется к точке наблюдения по воздуху и существует только до тех пор, пока существует ток в источнике. На своем пути волна преломляется на границе «земля - воздух» и проникает в нижнее полупространство. Угол преломления в земле α_e определяется законом Снеллиуса и при любом угле падения входящей волны, преломленная волна распространяется вертикально вниз в виде плоской волны с экспоненциальным затуханием по глубине z . При дальнейшем увеличении разноса, когда расстояние до источника r становится больше, чем длина волны в воздухе $\lambda_0 = 2\pi/|k_0|$ ($|k_e|r > |k_0|r > 1$) в распространении электромагнитного поля все большую роль начинают играть токи смещения. Электромагнитное поле распространяется в воздухе практически без затухания и продолжает существовать после того, как источник отключен. Таким образом, поле контролируемого источника может быть подразделено на 3 зоны – (i) ближняя, стационарная зона ($|k_e r| < 1, |k_0 r| < 1$); (ii) дальняя, «волновая» – квазистационарная зона ($|k_e r| > 1; |k_0 r| < 1$), назовем ее волновой зоной первого рода; (iii) дальняя, истинно волновая зона ($|k_e r| > 1; |k_0 r| > 1$).

Представленные выше принципы учета токов смещения проиллюстрированы в основном тексте статьи расчетно-теоретическими работами и примерами экспериментальных наблюдений.

РАЗДЕЛ 4

**МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ВОЗБУЖДЕНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И
ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ЕСТЕСТВЕННЫХ И МОЩНЫХ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Генераторы серии «Энергия» мощностью от 2 до 200 кВт для частотного электромагнитного зондирования земной коры

Колобов В.В., Баранник М.Б.

ЦЭС КНЦ РАН, Апатиты, 1_i@mail.ru, maxbar@ien.kolasc.net.ru

Генераторы серии «Энергия» разрабатывались для проведения электромагнитных зондирований с контролируруемыми источниками. В настоящий момент в серию входят четыре генератора, основные технические характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики генераторов серии «Энергия»

Характеристика	«Энергия-2»	«Энергия-2м»	«Энергия-3»	«Энергия-4»
Источник питания	Сеть 3 ф 380 В	Два ГПТ	Сеть 220 В	Два ГПТ
Мощность	200 кВт	2×15 кВт	2 кВт	30 кВт
Диапазон частот	0.01-200 Гц	0.01-200 Гц	0.01-200 Гц	4-2000 Гц
Максимальное $U_{\text{вых}}$	1100 В	500 В	300 В	1200 В
Максимальный $I_{\text{вых}}$	300 А	30 А на канал	10 А	60 А
Масса	1300 кг	600 кг	10 кг	600 кг
Особенность	Мощный, высоковольтный	Направленного действия	Портативный	Автономный, высоковольтный

Выходные инверторы генераторов «Энергия», выполненные на основе силовых IGBT модулей, работают в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что позволяет формировать в излучающих линиях ток произвольной формы, в том числе синусоидальной.

Генераторы «Энергия-2» и «Энергия-3» предназначены для зондирований с промышленными линиями электропередачи (ЛЭП). Генератор «Энергия-2» использовался при проведении зондирований с применением двух взаимно ортогональных ЛЭП на Кольском п-ове (международные эксперименты FENICS-2009, 2014), а «Энергия-3» – при проведении зондирований в Западной Сибири (эксперименты «НУР-2011, 2012») [1].

Генератор направленного действия «Энергия-2м» имеет двухканальный ШИМ-инвертор с независимой регулировкой амплитуды и фазы токов в двух ортогональных излучающих линиях, что позволяет создавать регулируемую диаграмму направленности излучения [1].

Автономный генератор «Энергия-4» предназначен для работы в аудиодиапазоне частот: от 4 до 2000 Гц. Генератор использовался при проведении многолучевых частотных зондирований в ходе эксперимента «Ковдор-2015» [2].

КНЧ-СНЧ генераторы «Энергия» не имеют аналогов и могут использоваться как для зондирования литосферы, так и для мониторинга сейсмоактивных зон.

Список литературы

1. Колобов В.В., Баранник М.Б., Жамалетдинов А.А. Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон. СПб: «СОЛО», 2013. 240 с.
2. Колобов В.В., Баранник М.Б., Ефимов М.Б., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Копытенко Ю.А. Генератор «Энергия-4» для мониторинга сейсмоактивных зон и электромагнитного зондирования земной коры: Опыт применения в эксперименте «Ковдор-2015» // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 3. С. 55-73. DOI: 10.21455/si2017.3-5.

Широкодиапазонная семиканальная измерительная станция КВВН-7

Колобов В.В. Баранник М.Б.

ЦЭС КНЦ РАН, Апатиты, 1_i@mail.ru

Разработана портативная универсальная измерительная станция КВВН-7, позволяющая выполнять измерения напряженности электрического и магнитного поля естественных и контролируемых источников. Регистрация сигналов осуществляется по семи каналам (три магнитных и четыре электрических) в широком спектре частот (0.1–2000 Гц) с подавлением помех на краях частотного диапазона и на нечетных гармониках промышленной частоты.

Станция КВВН-7 включает в себя комплект электрических и магнитных датчиков, измерительный блок, внешний 14-ти разрядный аналого-

цифровой преобразователь (АЦП) и портативный компьютер. В состав измерительного блока входят активные заградительные фильтры и фильтры нижних частот (ФНЧ), сигнал с которых поступает на вход АЦП. ФНЧ имеют амплитудно-частотную характеристику, позволяющую подавлять «зеркальные» частоты. Схема станции, ее конструкция и характеристики рассмотрены в [1, 2]

Для обеспечения температурной стабильности сквозной АЧХ измерительного блока станции в схемах фильтров используются пассивные компоненты с малой температурной зависимостью параметров – резисторы с низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС менее $25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и конденсаторы с низким температурным коэффициентом емкости (ТКЕ $\pm 30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Это позволяет эксплуатировать станцию без ухудшения ее характеристик в широком диапазоне температур.

Датчики магнитного поля станции имеют спектральные шумовые характеристики, не уступающие современным отечественным и зарубежным аналогам.

Станция разрабатывалась, в том числе, для использования при проведении глубинных электромагнитных зондирований в полях промышленных линий электропередачи (ЛЭП), питаемых от КНЧ-СНЧ генераторов «Энергия» различной мощности. Станция является универсальной, так как позволяет в одном цикле выполнять частотные зондирования с контролируемыми источниками и аудиомангнитотуллурические зондирования в поле естественных вариаций электромагнитного поля.

Станция успешно использовалась в ходе зондирований с промышленными ЛЭП на Кольском полуострове – эксперименты «FENICS-2009, 2014» и Западной Сибири – эксперименты «НУР-2011, 2012», а также в ходе многолучевых частотных зондирований с целью изучения дилатантно-диффузионного слоя – эксперимент «Ковдор-2015». Станция также входит в состав генераторно-измерительного комплекса «Энергия-Зонд» для электромагнитных исследований с использованием СпецЛЭП «Зевс».

Применение станции КВВН-7 позволяет исследовать электропроводность и флюидный режим верхней части земной коры для решения, как геологических задач, так и задач электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон в комплексе с сейсмическими методами.

Список литературы

1. Колобов В.В., Куклин Д.Н., Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А. Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 для элек-

тромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 2. С. 47-61.

2. Колобов В.В., Баранник М.Б., Жамалетдинов А.А. Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон. СПб: «СОЛО», 2013. 240 с.

Опыт регистрации сигналов станциями КВВН-7 и VMTU-10 в эксперименте «Ковдор-2015» по многолучевому частотному зондированию

Скороходов А.А.¹, Копытенко Е.А.², Самсонов Б.В.³

¹ ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, sammicne@yandex.ru

² СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург

³ ООО «ВЕГА», Санкт-Петербург

В 2015 г. усилиями сотрудников группы геоэлектрики лаборатории №23 ГИ КНЦ РАН и сотрудников ЦФТПЭС КНЦ РАН был проведен эксперимент Ковдор-2015 по многолучевому частотному электромагнитному зондированию с применением генератора излучений направленного действия [1]. Сигнал на точках наблюдений регистрировали 2 магнито-теллурические станции VMTU-10 и КВВН-7. Эти станции имеют различные амплитудно-частотные, фазово-частотные характеристики, динамический диапазон, фильтры и частоту дискретизации сигналов.

Станция КВВН-7 имеет 7 каналов: 3 магнитных и 4 электрических. На каждом канале имеются усилители 0-100дБ для магнитных каналов и 0-120 дБ для электрических. Характеристики индукционных датчиков показаны на рисунке 1а. Для оцифровки используется внешний АЦП, от которого зависит максимальная частота дискретизации и динамический диапазон. Станция VMTU-10, разработанная компанией ВЕГА, имеет 5 каналов, встроенные цифровые фильтры, завязанные с частотой дискретизации, и динамический диапазон до 32 бит. Характеристика представлена на рисунке 1б.

Обе станции имеют ряд преимуществ и недостатков. Результаты позволили установить, что станция VMTU-10 в условиях низких шумов позволяет более качественно регистрировать сигнал как искусственных, так и естественных источников. Однако, внутренний логгер не позволяет регистрировать сигнал на частотах порядка 1000 Гц и выше. Для решения

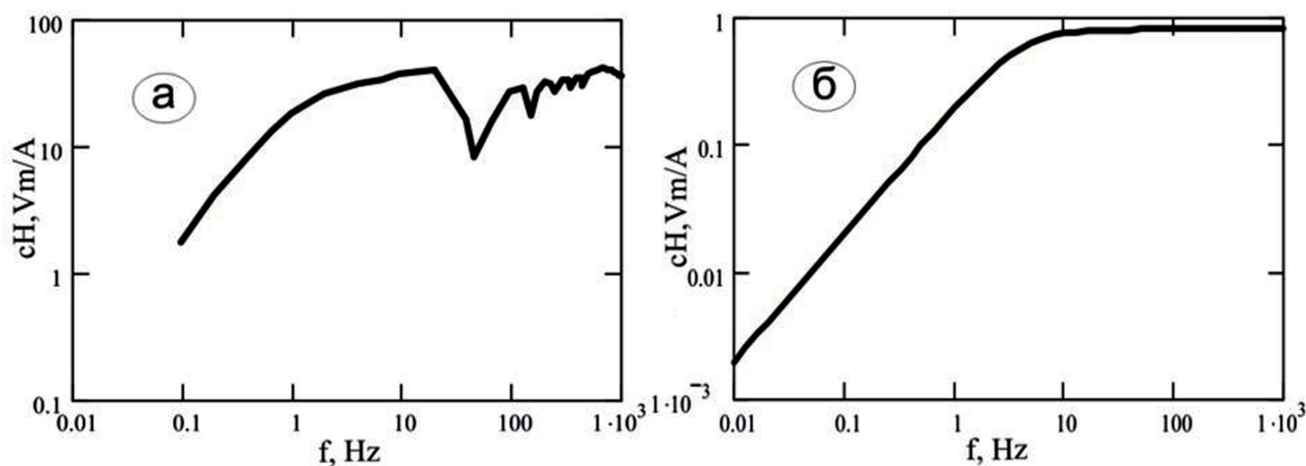


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики магнитных датчиков.
а) станция KBVN-7, б) станция VMTU-10

этой проблемы был применен внешний АЦП обладающий теми же характеристиками, что и АЦП на KBVN-7. Тем не менее, обработка показала, что станция VMTU-10 позволяет получать более качественный сигнал, особенно фазу.

Несмотря на очевидные преимущества, которые показала станция VMTU-10 в ходе эксперимента Ковдор-2015, в условиях сильных помех, чтобы уменьшить их влияние, необходимо было применять более длинные электрические линии (400 м), в то время как станция KBVN-7 в тех же условиях регистрировала сигнал на коротких линиях (100м).

Список литературы

1. Жамалетдинов А.А., Велихов Е.П., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Колесников В.Е., Скороходов А.А., Короткова Т.Г., Рязанцев П.А., Бируля М.А. Эксперимент «Ковдор – 2015» по изучению параметров слоя дилатантно-диффузионной природы проводимости в архейском кристаллическом основании Балтийского щита // Докл. Академии наук. Т. 474 № 4. 2017. С. 477-482.

Специфика применения промышленных ЛЭП в качестве излучателей при проведении частотных электромагнитных зондирований

Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В.

ЦЭС КНЦ РАН, Апатиты, ivonin@ien.kolasc.net.ru

При использовании мощными КНЧ-СНЧ генераторами для геофизических исследований в качестве излучающих антенн воздушных линий электропередачи (ЛЭП), для обеспечения максимальной силы тока в линии на частотах выше единиц герц, необходима компенсация индуктивной составляющей полного сопротивления ЛЭП. Для решения данной проблемы было разработано согласующее устройство (СУ). Величина емкости согласующего устройства $C_{СУ}$ на любой частоте генерации $f_{Г}$ должна быть такой, чтобы обеспечить резонанс напряжений в индуктивной нагрузке:

$$2\pi f_{Г} L_{ЛЭП} = \frac{1}{2\pi f_{Г} C_{СУ}}$$

Суммарная емкость СУ определяется параллельным соединением конденсаторов в необходимой конфигурации с помощью ключей. При этом ёмкость согласующего устройства изменяется в диапазоне $C_{СУ} \in [C, C^n - C]$ с шагом дискретности установки емкости согласующего устройства $\Delta C_{СУ} = C$.

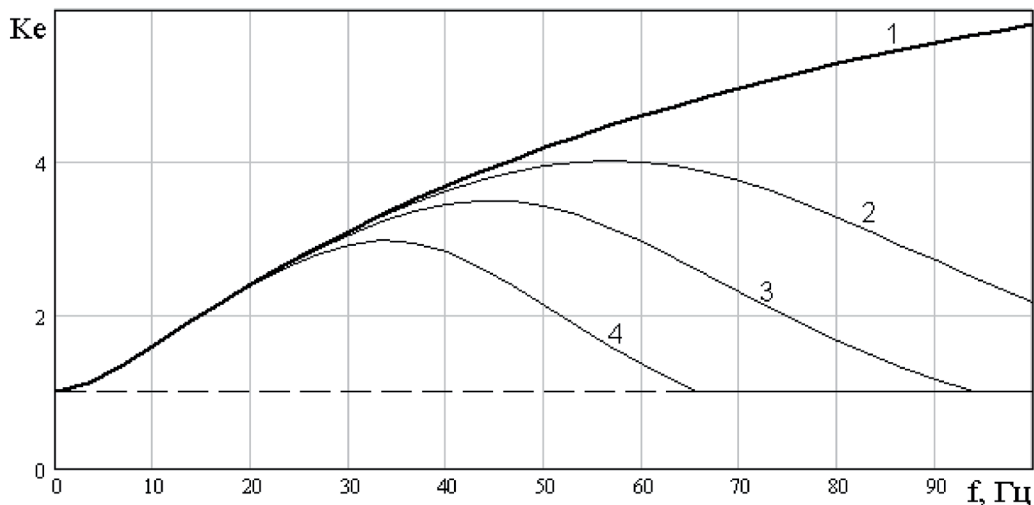


Рис. 1. Частотная зависимость эффективности согласующего устройства: 1 — при идеальном согласовании, 2, 3, 4 — при дискретности установки ёмкости согласующего устройства 16, 30 и 60 мкФ, соответственно.

В качестве оптимально достаточной представляется схема согласующего устройства, состоящая из 9-ти конденсаторов с различными номиналами емкости и 11-ти ключей, с помощью которых конденсаторы коммутируются так, чтобы обеспечить необходимую емкость СУ для компенсации индуктивности ЛЭП во всем диапазоне дискретных частот генерации. Значение минимальной емкости конденсатора C_1 , определяющая дискретность установки емкости СУ, составляет 16 мкФ. Эффективность такого СУ характеризует кривая 2 на рис. 1. Как видно из рисунка, на частотах генерации менее 50 Гц эффективность такого СУ близка к эффективности идеального согласующего устройства.

Электромагнитная совместимость мощных источников КНЧ поля на основе промышленных ЛЭП с объектами энергетики

Колобов В.В., Баранник М.Б., Ивонин В.В.

ЦЭС КНЦ РАН, Апатиты, ivonin@ien.kolasc.net.ru

Вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) мощного КНЧ-генератора и излучающей ЛЭП с оборудованием подстанций можно условно разделить на две группы:

1. Воздействие на генератор опасных внешних факторов техногенного и природного характера и защита от них;

2. Проблемы негативного воздействия на оборудование подстанции, каналы телеметрии, линии связи и подземные коммуникации, находящиеся в зоне влияния излучающей ЛЭП, и способы их решения.

Среди причин, которые могут привести к возникновению перенапряжений на выходе высоковольтного инвертора (ВИ) и соответственно звена постоянного тока (DC-шине) инвертора, и которые представляют потенциальную опасность повреждения оборудования, можно выделить:

– перенапряжения, возникающие при переходе индуктивной энергии ЛЭП в электрическую энергию конденсаторов звена постоянного тока инвертора при коммутации ключей ВИ;

– напряжения, наведенные в излучающей ЛЭП соседними линиями, находящимися в работе;

– грозовые перенапряжения.

Синусоидальная форма выходного сигнала высоковольтного инвертора формируется посредством ШИМ, то есть при помощи изменения ширины импульса на отрезке квантования, на которые разбивается весь период сигнала, что в конечном итоге изменяет амплитуду выходного напряжения, в пределах данного интервала, после фильтрации. Из-за дискретности преобразования, сигнал получается не идеально сглаженным, в нём присутствуют высокочастотные гармонические составляющие. В низкочастотной части спектр содержит только основную гармонику с частотой f_1 , а в области высоких частот группы комбинационных гармоник, расположенные вблизи частот, кратных частоте коммутации f_k . Интенсивность высших гармонических составляющих в спектре ШИМ-последовательности характеризует коэффициент гармоник. Регулирование амплитуды тока в излучающей линии за счет ШИМ также ухудшает коэффициент гармоник, увеличивая действующее значение высших гармонических составляющих. Таким образом, возникает задача фильтрации высокочастотных гармонических составляющих в выходном синусоидальном токе инвертора.

Опыт проведения работ по программам «FENICS-2007» «FENICS-2009» и «FENICS-2014» при размещении КНЧ-СНЧ генераторов «Энергия-1» и «Энергия-2» на электрической подстанции Выходной – Серебрянская ГЭС (п/с 200) Филиала ОАО «ФСК ЕЭС» Карельское ПМЭС показал, что главный путь проникновения помех, приводящих к сбоям в работе аппаратуры ВЧ связи и телеметрии подстанции размещения – контур заземления подстанции. Одним из способов исключения этого влияния, является перенос точки заземления выхода высоковольтного инвертора как можно дальше от контура заземления ОПУ, в котором расположен релейный зал.

Особенности использования вариационных и индукционных магнитометров в экстремально низкочастотном диапазоне

Терещенко П.Е.^{1,2}, Сергушин П.А.¹, Григорьев В.Ф.²

¹ СПбф ИЗМИРАН, Санкт-Петербург

² ПГИ, Апатиты, tereshchenko@gmail.com

Для регистрации искусственных сигналов, а также естественных вариацией магнитного поля Земли на низких частотах (от 0.001 до 10 Гц)

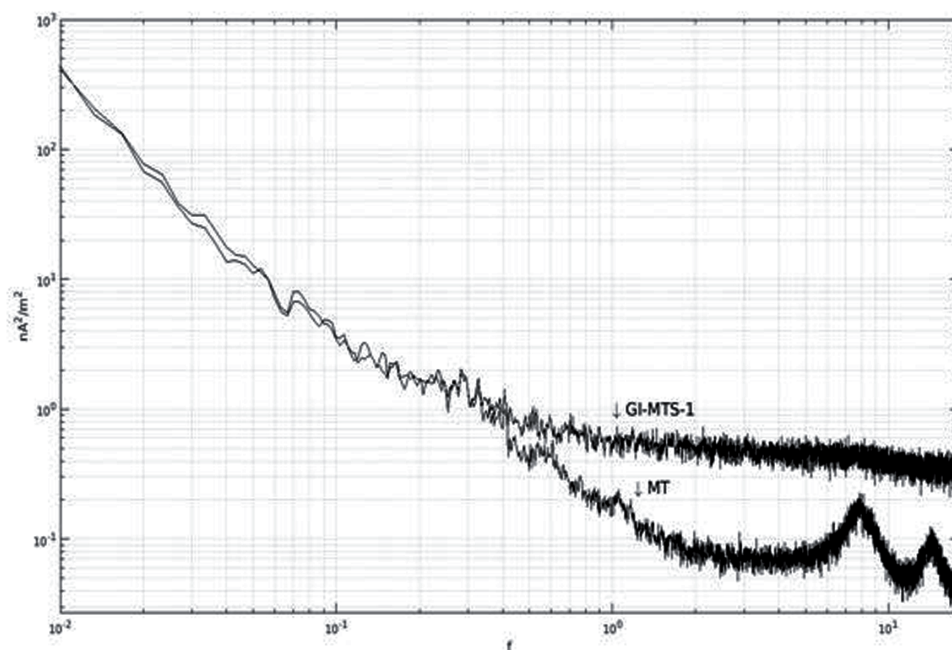


Рис. 1. Спектральная плотность магнитного шума, измеренная датчиками разной конструкции.

возможно использование принципиально разных по конструкции магнитометров. Традиционно считается, что на частотах более 5 Гц выше чувствительность индукционных магнитометров, а на низких - торсионных. Но в последние годы новая техническая база меняет эти границы.

Было произведено сравнение показаний индукционных датчиков переменного магнитного поля МТ производства ФГУ МПП «Геологоразведка» с торсионными датчиками магнитовариационной станции GI-MTS-1 в субавроральной зоне в точке, удаленной от источников техногенных низкочастотных шумов, в спокойной геомагнитной обстановке. Данные записывались регистратором ИЗМИРАН с 32-х битным АЦП с привязкой к времени GPS. АЧХ индукционных датчиков была экспериментально получена прямыми измерениями в диапазоне 0.01-100 Гц и продлена до 0.001 Гц с помощью аппроксимация значений передаточной характеристики дробно-рациональной функцией методом $Sbplx$. АЧХ торсионного датчика получена прямыми измерениями в диапазоне 0.001-10 Гц.

С помощью спектрального анализа данных по методу Уэлча были получены данные о спектральной плотности низкочастотного электромагнитного шума в диапазоне 0.001-20 Гц. На рисунке видно, что зарегистрированные датчиками вариации магнитного шума в диапазоне 0.001-0.4 Гц совпадают на обоих датчиках. На более высоких частотах внутренний шум торсионного датчика выше показаний индукционного и не отражает естественных процессов, таких как первый и второй Шумановские резонансы.

Таким образом, можно сделать вывод, что зафиксированные индукционным датчиком шумы являются преимущественно внешними и выше его внутренних шумов в исследованной частотной области. Соответственно, современные индукционные датчики можно использовать в широком диапазоне низких частот, что важно для задач МТЗ, исследования ионосферы и регистрации искусственных сигналов.

Донная магнитотеллурическая станция ВЕГА-ММТ

Копытенко Е.А.^{1,2}, Самсонов Б.В.²

¹ СПбФ ИЗМИРАН, eugene.kopytenko@vega-geophysics.com

² ООО «ВЕГА», boris.samsonov@vega-geophysics.com

Многолетний опыт разработки компании ВЕГА оборудования для электроразведки с использованием естественных низкочастотных электромагнитных полей был аккумулирован при создании малоглубинной донной МТ-АМТ станции для переходной зоны. Отличительной особенностью оборудования от аналогов является наличие поверхностного плавающего буя, оборудованного GPS приёмником и Wi-Fi точкой доступа, связанными с донным модулем герметичным кабелем, а также использование индукционных датчиков серии IMS собственного производства. Применяемая архитектура построения конструкции станции позволяет использовать её на мелководных акваториях практически при таких же режимах съёмки, как и на поверхности Земли, в том числе и с использованием технологии «Remote reference». Основные параметры станции следующие:

- максимальная глубина использования – 50 м
- диапазон измеряемых частот – 0.0002 – 1000 Гц
- автономность работы – 24 часа
- электрические линии с неполяризуемыми электродами.

Область применения – морская электроразведка методом магнитотеллурического зондирования, магнитотеллурического профилирования в так называемых переходных шельфовых зонах морей, озёр, дельт рек. В комплексе с наземной станцией VMТU-10 возможно проведение непрерывного МТ профилирования суша – мелководная акватория.

Наиболее востребовано использование станции в области нефтяной и газовой индустрии, как для разведки непосредственно полезных ископаемых, так и для инженерной электроразведки с целью выявления особен-

ностей строения донных отложений прибрежных акваторий перед возведением портовых и промысловых сооружений.

Приводятся примеры результатов обработки МТ зондирований во время испытаний опытного образца станции на акватории Финского залива.

Метод синхронных МТ/МВ зондирований в глубинных и разведочных приложениях: системы наблюдения и многоточечные процедуры обработки данных

Варенцов Ив.М.

ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Троицк, ivan_varentsov@mail.ru

Современный тренд развития методов ЭМ зондирования Земли с использованием естественных полей основан на использовании синхронных систем наблюдения, совместном оценивании и дальнейшем комплексном анализе ансамбля МТ и МВ передаточных операторов [1, 2]. Синхронная регистрация ведется для кластеров перемещаемых полевых инструментов и стационарных пунктов наблюдения. В качестве последних при глубинных исследованиях чаще всего используются геомагнитные обсерватории, обеспечивающие секундную дискретизацию.

Синхронные наблюдения является существенным фактором повышения качества оценивания локальных передаточных операторов – импеданса и типпера – путем исключения из формул оценивания автоспектров ЭМ полей, систематически искажаемых внутренними аппаратурными и внешними локальными шумами. Наряду с этим, они расширяют ансамбль данных, доступный для дальнейшей интерпретации, обеспечивая возможность определения многообразия двухточечных и многоточечных передаточных операторов, самыми известными из которых являются горизонтальные теллурический и магнитный операторы и синхронный типпер [1, 2]. Особое значение имеют оценки горизонтального МВ оператора. Анализ их пространственно-частотной структуры для серии удаленных синхронных пунктов позволяет исключать из обработки временные окна с существенной неоднородностью возбудителей поля и высокой интенсивностью локальных и региональных промышленных шумов. В докладе рассматриваются широкие возможности совместного помехоподавляющего оценивания импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика в рамках программной системы PRC_MTMV, разработанной в

ЦГЭМИ ИФЗ РАН и обеспечивающей анализ синхронных наблюдений для кластеров разнородной аппаратуры, как полевой (GEOMAG-02, KMS-820, LEMI-417, Phoenix MTU, Vega и др.), так и обсерваторской.

Существенной проблемой МТ метода является возможность сильных искажений импеданса (прежде всего, его амплитудных компонент) приповерхностными структурами, не являющимися объектами исследований. Поэтому в ходе дальнейшей интерпретации полученных ансамблей передаточных операторов акцент следует делать на импедансные фазы и МВ отклики, свободные от приповерхностных искажений в большей части частотного диапазона зондирований. При решении возникающих 2D/3D обратных задач включение горизонтальных откликов в ансамбль инвертируемых данных повышает разрешающую способность (их амплитудные параметры явно локализуют аномальные токовые системы в плане и на псевдорезах) и устойчивость (их относительно простая пространственно-частотная структура становится фактором дополнительной стабилизации).

Технология синхронного МТ/МВ зондирования легко масштабируется для решения задач различной глубинности – от рудных в диапазоне самых первых км до тектоносферных на глубинах первых сотен км.

Представленные результаты получены при частичной поддержке РФФИ в рамках гранта 16-05-00791_a.

Список литературы

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 679 с.
2. Варенцов Ив.М. Разрешающая способность современных ЭМ геофизических методов с естественным возбуждением поля // Разведка и охрана недр. 2006. № 8. С. 66-71.

Обработка данных синхронных МТ/МВ зондирований: примеры в различных приложениях

Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н.

ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Москва, Троицк, ivan_varentsov@mail.ru

Несмотря на широкое распространение синхронных систем наблюдения при проведении МТ зондирований, еще у многих исследователей

остаются иллюзии возможности эффективной работы по схеме одиночной регистрации. При этом далеко не всегда можно пренебречь возникающими искажениями результатов под влиянием аппаратурных шумов и эффектов неоднородности возбуждения поля, а уровень искажений, связанных с культурными и индустриальными ЭМ шумами, растет с каждым годом и становится значимым даже в весьма «заповедных» местах, особенно в областях с низкой приповерхностной продольной проводимостью, например, на щитах и кристаллических массивах.

В работе рассматриваются искажения односточечных оценок импеданса и типпера на примере длиннопериодных зондирований в малонаселенной долине Восточного Тибета (с аппаратурой LEMI-417) и в плотно населенной области индийского штата Ассам (с аппаратурой KMS-820) и демонстрируются возможности их подавления с использованием синхронно работающих полевых станций и удаленных геомагнитных обсерваторий Китая и Вьетнама в рамках программного обеспечения, разработанного в ЦГЭМИ ИФЗ РАН [1-4].

В заключение отметим, что переход к синхронной схеме зондирования при глубинных исследованиях с секундной дискретизацией достаточно прост и не требует дополнительной аппаратуры – почти всегда в 1000-км окрестности можно найти геомагнитную обсерваторию с аналогичной дискретизацией.

Представленные результаты получены при частичной поддержке РФФИ в рамках грантов 16-55-45052_ИНД_a и 17-55-53102_ГФЕН_a.

Список литературы

1. Варенцов Ив.М. Новые алгоритмы в программной системе обработки данных синхронных МТ/МВ зондирований // Вопросы естествознания. 2016. № 3(11). С. 48-52.
2. Варенцов Ив.М., Лозовский И.Н. Комплексование разведочной и длиннопериодной аппаратуры при проведении синхронных МТ/МВ зондирований литосферы // Вопросы естествознания. 2016. № 1(9). С. 74-79.
3. Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р. и др. Методика построения передаточных операторов ЭМ поля для массива синхронных зондирований BEAR // Физика Земли. 2003. № 2. С. 30-61.
4. Varentsov Iv.M. Arrays of simultaneous electromagnetic soundings: design, data processing, analysis, and inversion // EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice. Elsevier. 2015. P. 271-299.

РАЗДЕЛ 5

**ПРОЕКТ-ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ «МУРМАН-2018» И
«FENICS-2019», ПЛАНИРУЕМЫХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПО ГРАНТУ
РФФИ 18-05-00528 НА 2018-2019 гг.**

Дискуссионные проблемы глубинной электропроводности Мурманского блока

Жамалетдинов АА.

ГИ КНЦ РАН, Апатиты, abd.zham@mail.ru

Мурманский блок сложен древнейшими породами гранитоидного состава. Он отличается монотонным геологическим строением и отсутствием крупных залежей рудных полезных ископаемых. Поэтому на территории Мурманского блока практически не проводилось поисково-разведочных работ. Строение его изучено, главным образом на основании кондиционных гравимагнитных съемок.

Первые электроразведочные работы на Мурманском блоке выполнены методом ВЭЗ с разносами до 16 м в 70-е годы прошлого века сотрудниками Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) университета с целью выбора плохо проводящего полигона для строительства объекта сверхнизкочастотной (СНЧ) радиосвязи «Зевс». В конце 70-х годов на территории Мурманского блока выполнены зондирования в поле МГД-источника «Хибины» в комплексе с магнитотеллурическими зондированиями (МТЗ). Геоэлектрический разрез построенный по результатам МТЗ характеризуется высоким сопротивлением до глубины 50 км. Ниже, в интервале глубин 50-80 км залегает промежуточный проводящий слой с продольной проводимостью до 270 См.

В районе Териберки в 1980 г. выполнен эксперимент по регистрации длиннопериодных (10 с) аккумуляторных сигналов от МГД-контура «Хибины» на удалении ~300 км. Полученные результаты подтвердили высокое сопротивление земной коры и, наряду с этим, позволили количественно исследовать роль статических искажений. С увеличением MN от 0.1 до 0.5 км значения напряженности поля $E = \Delta U / MN$ увеличивались в 3 раза. При дальнейшем увеличении MN до 1.6 км значения E стабилизировались.

По следам этой работы в 1984 г. А.А. Ковтун с сотрудниками выполнены АМТ-МТ зондирования по дороге на Териберку в широком диапазоне частот (1000-0.0001 Гц). Интерпретация результатов сопровождалась численным и физическим моделированием. Полученный электрический разрез отличается от всех предыдущих наличием трех проводящих горизонтов в интервалах глубин 10-20 км, 32-90 км и 190 км.

Для проверки полученного А.А. Ковтун крайне интересного результата нами в 1986 г. Выполнен эксперимент по частотному зондированию

с генератором ЭРС-69 в диапазоне частот 1-1000 Гц. Рабочие разности достигали 88 км. На разности 39 км кривая ρ_{ω} «провалилась» вниз, указывая на существование проводящего «слоя» на глубине 10 км. Однако, на разности 88 км кривая ρ_{ω} снова приобрела восходящий вид, указывая на отсутствие проводников до глубин, по крайней мере, 30-40 км.

Новейшей работой по Мурманскому блоку явились исследования Полярного геофизического института совместно с Курчатовским Институтом атомной энергии, выполненные в 2009 г. Измерения проводились в поле СНЧ-антенны «Зевс» с применением магнитных индукционных датчиков в диапазоне частот 0.1 – 38 Гц. По результатам выполненной работы установлена сеть глубинных хорошо проводящих разломов с удельным сопротивлением 1 Ом·м, пересекающих территорию Мурманского блока, а также коровый проводник на глубине порядка 2 км с удельным сопротивлением порядка 1 Ом·м.

Таким образом, результаты, полученные разными исследовательскими группами на территории Мурманского блока, различаются на много порядков по оценкам величины кажущегося сопротивления глубинных слоев земной коры и характера геоэлектрического разреза. Разрешение имеющихся противоречий требует проведения дополнительных исследований.

Проект-программа эксперимента «Мурман-2018» по глубинному электромагнитному зондированию земной коры на территории Мурманского блока в частотном и дистанционном представлениях (мозговая атака)

Жамалетдинов А.А.¹, Ефимов Б.В.², Шевцов А.Н.¹, Скороходов А.А.¹, Колесников В.Е.¹, Баранник М.Б.², Колобов В.В.², Ивонин В.В.²

¹ГИ КНЦ РАН, Апатиты, abd.zham@mail.ru

²ЦЭС КНЦ РАН, Апатиты, 1_i@mail.ru

Главная задача эксперимента «Мурман-2018» – решить дискуссионный вопрос о существовании на глубине 10 км промежуточного проводящего слоя с продольной проводимостью до 20 См [2]. Наряду с этим, стоит противоположная задача проверки гипотезы о возможном существовании на глубине 10 км границы высокого сопротивления или иначе границы непроницаемости для гальванических токов [1]. Схема расположения питающих линий в виде двух взаимно-ортогональных диполей АВ1

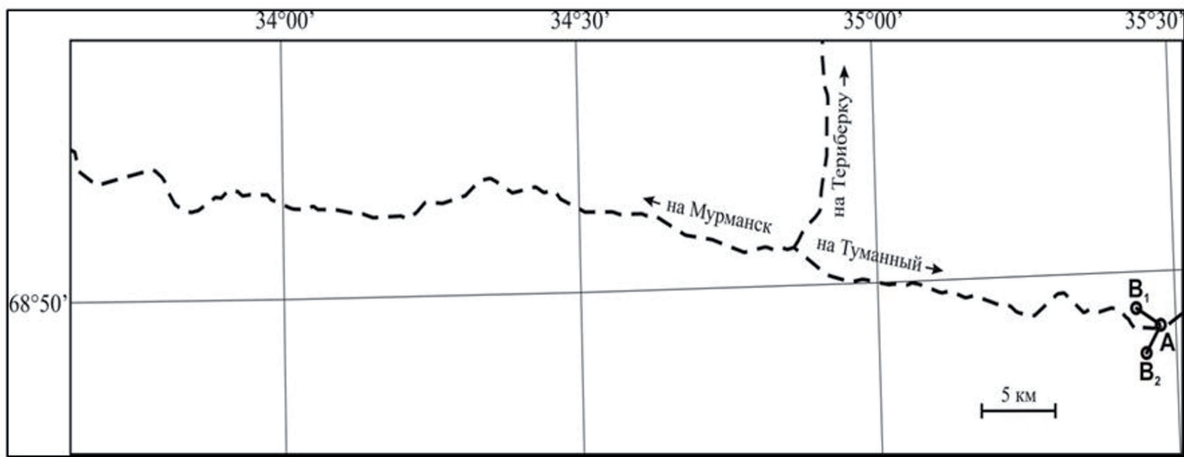


Рис. 1. Схема эксперимента Мурман-2018.

и АВ2 показана на рисунке. Питающие заземления будут располагаться в озерах с охватом площади периметром не менее 400 м., чтобы обеспечить переходное сопротивление не более 40-50 Ом.

Зондирования будут выполнены в частотном и дистанционном приближениях. Для выбора точек приема будет выполнено электропрофилеирование МВСД на первом этапе работ с шагом 500 м. Точки приема будут располагаться в наиболее однородных плохо проводящих интервалах профиля. Ток в питающие линии будет подаваться от генератора «Энергия-4» мощностью 29 кВт по согласованной программе в диапазоне частот 2-2000 Гц и в виде разнополярных прямоугольных сигналов периодом 0.25 с. Максимальный рабочий разнос предполагается 70 км. В каждой точке приема будет выполнено АМТ-МТ зондирования. Задача АМТ-зондирования будет заключаться в определении параметров вертикального разреза глубже 10-20 км. При этом важной особенностью всей работы явится методика учета влияния статик-шифта на результаты АМТ-МТЗ на основании результатов частотного зондирования по полному горизонтальному магнитному полю.

Список литературы

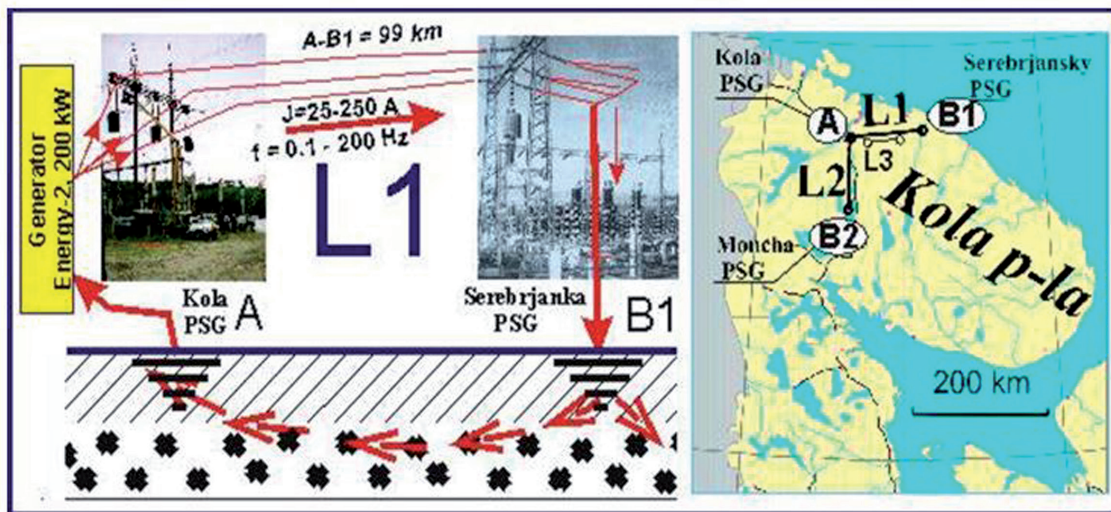
1. Жамалетдинов А.А. О границе непроницаемости (непреодолимости) в земной коре с позиции глубинной геоэлектрики и сверхглубокого бурения // Труды XIV Всероссийской Ферсмановской научной сессии. Апатиты, ГИ КНЦ РАН, 2017. С. 90-92.
2. Ковтун А.А. и др. МТ- и АМТ-зондирования на Кольском полуострове и в Карелии. Глубинная электропроводность Балтийского щита // Петрозаводск.: Изд-во: Карельск. фил. АН СССР. 1986. С. 34-48.

Основные результаты экспериментов «FENICS-2007», «FENICS-2009» и «FENICS-2014» по частотному электромагнитному зондированию с применением двух взаимно ортогональных промышленных ЛЭП (обзор)

Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н.

ГИ КНЦ РАН, Апатиты, abd.zham@mail.ru

Эксперимент «FENICS-2007» явился важным звеном в цепи экспериментов по сверхглубинному электромагнитному зондированию литосферы, начатому в 1974 г. с МГД-эксперимента «Хибины» под руководством академика Е.П. Велихова. Главная задача эксперимента «FENICS» заключалась в создании метода, аналогичного АМТЗ, но с применением контролируемого источника. С этой целью предусмотрено использование двух взаимно-ортогональных промышленных линий электропередачи (ЛЭП) в качестве излучателей, создающих электромагнитное поле, поляризованное в двух ортогональных друг другу направлениях. Схема установки «FENICS» приведена на рисунке ниже.



На правой панели приведено положение двух ЛЭП $L1$ и $L2$ протяженностью 102 и 120 км, соответственно. На левой панели показана рабочая схема питающей установки на примере субширотной линии Кола-Серебрянка ($L1$ на правой панели). Ток в промышленные ЛЭП подается от генератора «Энергия» мощностью до 200 кВт в периоды времени, когда ЛЭП выводятся из работы для проведения профилактических работ. Ток генератора изменяется от 200-250 до 50-60 А в частотном диапазоне от 0.1 до 200 Гц. Глубинные зондирования с установкой «FENICS» выполнены в 2007, 2009 и 2014 годах. Измерения выполнены на удаленностях

до 850 км на территории Фенноскандинавского щита и на удаленностях до 5.6 тыс. км за его пределами.

В качестве основных можно выделить следующие результаты экспериментов «FENICS»:

- Установлена высокая степень горизонтальной однородности (однородности) геоэлектрического разреза литосферы восточной части Балтийского щита в диапазоне глубин от 10-15 до 50-70 км с коэффициентом анизотропии не выше 1.2.
- Установлена аномалия пониженного поперечного сопротивления литосферы, обрамляющая с востока область погружения границы Мохо до 55-60 км, установленного по сейсмическим данным на западе Карелии и в Центральной Финляндии.
- Исследованы параметры «нормального» и «аномального» геоэлектрического разреза литосферы Балтийского (Фенноскандинавского) щита и выполнена их геотермическая и реологическая интерпретация.
- Получены новые данные об особенностях влияния ионосферы и токов смещения на распространение ЭМ волн по результатам измерений на удаленностях до 5600 км.

База данных эксперимента «FENICS»

Колесников В.Е.

ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, vk51@list.ru

В 2007, 2009 и 2014 годах группой исследователей из ГИ и ЦФТПЭС КНЦ РАН были выполнены эксперименты по глубинному зондированию с мощными контролируемыми источниками (промышленными ЛЭП) по проекту «FENICS» [1]. Зондирования выполнены в восточной части Балтийского щита (Мурманская область и Карелия) в 24 пунктах. После обработки полевых материалов результаты были собраны в банк данных. С целью упрощения поиска результатов работ в конкретном пункте была создана карта данных эксперимента «FENICS» на основе геологической карты Балтийского щита [2].

Карта данных представляет собой структурированную презентацию, созданную с помощью Microsoft Power Point. В режиме создания презентации можно добавлять, изменять или удалять информацию о выполнен-

ных исследованиях и результатах обработки данных. В режиме показа слайдов карта выполняет основную, демонстрационную функцию – поиск и отображение данных по конкретным территориям и пунктам зондирования.

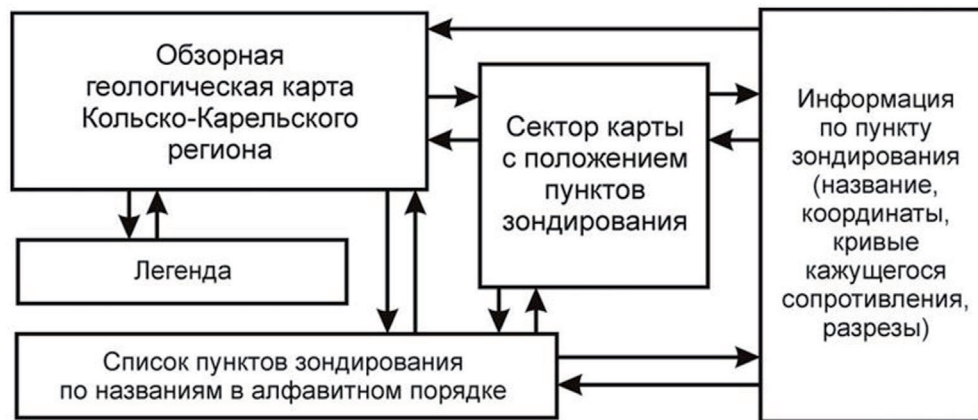


Рис. 1. Схема карты данных эксперимента «FENICS». Стрелками указаны направления перехода между слайдами.

К преимуществам в работе с картой данных относится наглядность представления информации, связь с геологическими данными об изучаемой территории, понятный интерфейс и навигация, возможность поиска сведений о конкретном пункте исследований (выбор пункта из списка) и об определённой территории (выбор сектора карты).

Основные недостатки текущей версии карты – сложность добавления новых пунктов на карту, невозможность произвольного масштабирования карты. Дальнейшая разработка и развитие карты данных будет связана с использованием сервиса «Яндекс. Карты», возможности которого позволят устранить имеющиеся недостатки и расширить функциональные возможности (например, возможность измерения расстояний, наложение дорожной сети на карту).

Список литературы

1. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Велихов Е.П., Скороходов А.А. и др. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ-СНЧ диапазона (0.1-200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент «FENICS») // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14. № 2. С. 5-49.
2. Koistinen T., Stephens M.B., Bogatchev V., Nordgulen O., Wennerstrom M. and Korhonen J. 2001. Geological map of the Fennoscandian Shield, scale 1:2000000. Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia.

Проект-программа эксперимента «FENICS-2019» по электромагнитному зондированию в частотном и дистанционном представлениях (мозговая атака)

Жамалетдинов А.А.¹, Ефимов Б.В.², Шевцов А.Н.¹, Баранник М.Б.²,
Колобов В.В.², Селиванов В.Н.²

¹ ГИ КНЦ РАН, Апатиты, abd.zham@mail.ru

² ЦЭС КНЦ РАН, Апатиты, 1_i@mail.ru

В 2019 г. намечено провести международный эксперимент «FENICS-2019» по тензорному частотному зондированию с двумя взаимно-ортогональными промышленными ЛЭП. Зондирования будут выполнены с применением субширотной линии электропередачи ВЛ 330 кВ «Кола-Серебрянка» протяженностью 109 км и субмеридиональной линии электропередачи ВЛ-220 кВ «Кола-Оленегорск-Мончегорск» протяженностью 120 км. Измерения будут проводиться по согласованию с ОАО «Колэнерго» в периоды проведения профилактических ремонтных работ, в ночное время. Генераторная установка будет размещена на подстанции КолЭнерго № 200, расположенной в районе поселка Выходной (Кола). Здесь будет установлен генератор «Энергия-2» мощностью до 200 кВт и система высоковольтных согласующих конденсаторов. Схема района работ показана ниже.

Измерения 2019 года будут выполнены на западном фланге Карельского мегаблока, на востоке от Онежской мульды и в районе Ладожской аномалии (рис. 1). Цель работы – уточнить положение границы пониженного поперечного сопротивления литосферы в северо-восточном обрамлении аномально низкого положения сейсмической границы Мохо, уточнить параметры Ладожской аномалии электропроводности и уплотнить и расширить сеть наблюдений для последующей квази-3D интерпретации. Будет выполнена количественная одномерная интерпретация результатов ранее выполненных и новых работ по глубинному зондированию. На основе полученных данных будет составлен банк одномерных геоэлектрических разрезов на всю восточную часть Балтийского щита. На основе этих данных будут рассчитаны двухмерные геоэлектрические разрезы и составлена квазитрехмерная модель электропроводности восточной части Балтийского щита.

Полученная модель электропроводности будет использована для расчетов температуры и реологии литосферы Восточной части Балтийского

щита, с последующим построением квази-3D моделей соответствующих параметров.

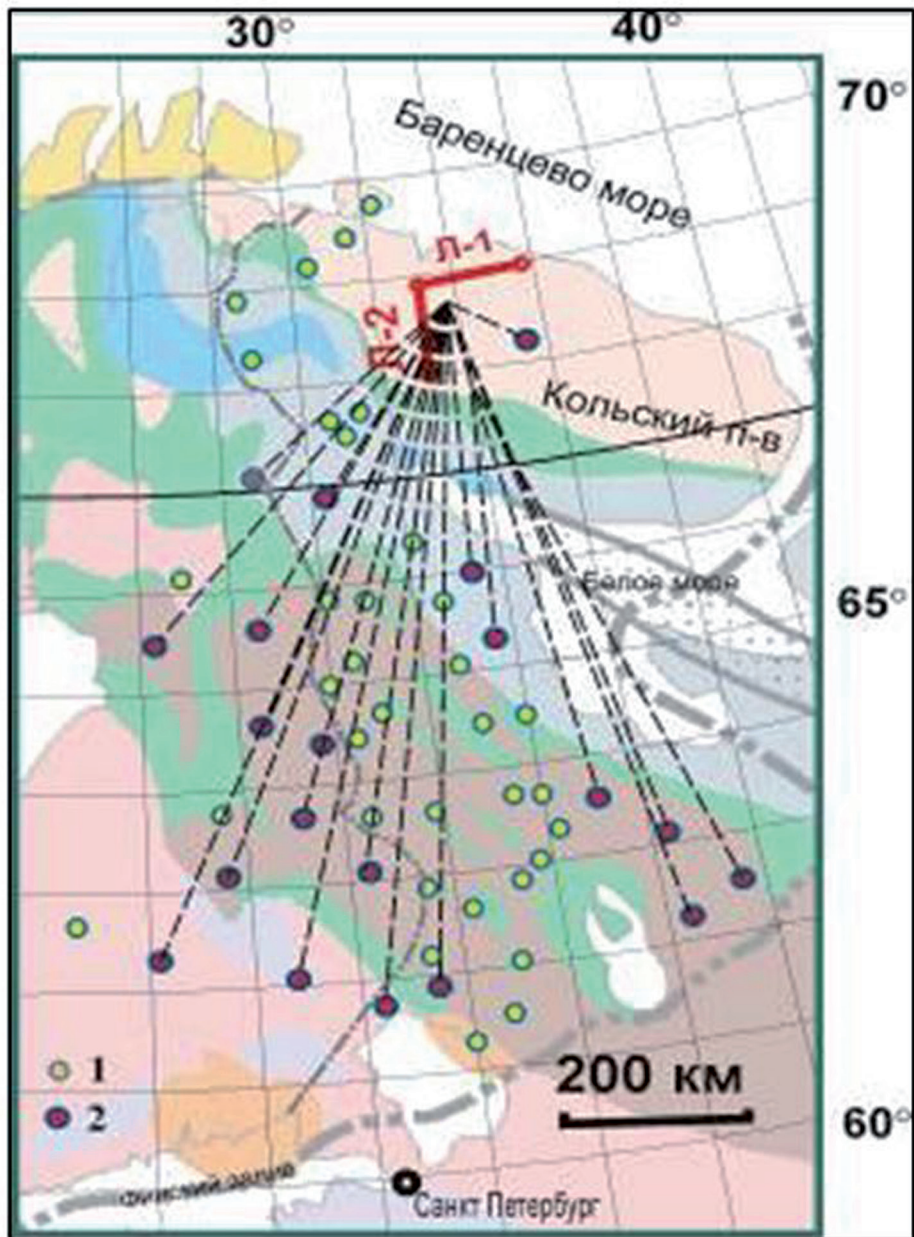


Рис. 1. Проектная схема расположения пунктов зондирования в эксперименте «FENICS-2019».

1 – пункты зондирования в экспериментах «FENICS» 2007, 2009 и 2014 годов.

2 – пункты зондирования, запланированные на 2019 год.

<i>Алфавитный список авторов</i>	<i>Страницы</i>
Бай Д.	27
Баранник М.Б	37, 38, 42, 43, 52, 57
Бёрнер Р.	24
Валья Д.	27
Варенцов Ив.М.	22, 24, 27, 47, 48
Виноградов А.Н.	9
Григорьев В.Ф.	30, 44
Ефимов Б.В.	57
Жамалетдинов А.А.	10, 21, 34, 51, 52, 54, 57
Иванов П.В.,	27
Ивонин В.В.	42, 43, 52
Ковачикова С.	22
Колесников В.Е.	52, 55
Колобов В.В.	37, 38, 42, 43, 52, 57
Копытенко Е.А.	40
Кумар С.	27
Ли С.	27
Лозовский И.Н.	22, 24, 27, 48
Любчич В.А.	30
Мягков Д.С.	15
Петрищев М.С.	19
Ребецкий Ю.Л.	15, 28
Самсонов Б.В.	40, 46
Селиванов В.Н.	57
Семёнов В.Ю.	19
Сергушин П.А.	44
Скороходов А.А.	21, 33, 40, 52
Терещенко П.Е,	44
Шаров Н.В.	12
Шевцов А.Н.	13, 18, 31, 34, 52, 54, 57

Сборник тезисов II Всероссийского
(с международным участием)
научно-практического семинара

**Квази-3D модель электропроводности, температуры и
реологии литосферы восточной части Балтийского
щита по результатам электромагнитных зондирований
с естественными и мощными контролируруемыми источниками**

Апатиты, 16-21 апреля 2018г.

Ответственный редактор
А.А. Жамалетдинов

Отпечатано в ГИ КНЦ РАН
184209 г. Апатиты Мурманской обл.
ул. Ферсмана, д. 14
тел.: (81555) 79656

Тираж 30 экз.



ФИЦ КНЦ РАН
Геологический институт