

ISSN 0002-3337

Номер 6

Ноябрь - Декабрь 2013



# ФИЗИКА ЗЕМЛИ

<http://www.naukaran.ru>  
<http://www.maik.ru>

В журнале публикуются оригинальные теоретические и экспериментальные научные работы и обзоры по глобальной и прикладной геофизике, касающиеся изучения земных недр.



“НАУКА”

## Журналы РАН, выходящие в свет на русском языке

Автоматика и телемеханика*	Молекулярная биология*
Агрохимия	Наука в России
Азия и Африка сегодня	Научное приборостроение
Акустический журнал*	Нейрохимия*
Алгебра и анализ	Неорганические материалы*
Астрономический вестник*	Нефтехимия*
Астрономический журнал*	Новая и новейшая история
Биологические мембраны*	Общественные науки и современность
Биология внутренних вод*	Общество и экономика
Биология моря*	Океанология*
Биоорганическая химия*	Онтогенез*
Биофизика*	Оптика и спектроскопия*
Биохимия*	Палеонтологический журнал*
Ботанический журнал	Паразитология
Вестник РАН*	Петрология*
Вестник древней истории	Письма в Астрономический журнал*
Вестник ЮНЦ	Письма в Журнал технической физики*
Водные ресурсы*	Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*
Вопросы истории естествознания и техники	Поверхность*
Вопросы ихтиологии*	Почвоведение*
Вопросы философии	Приборы и техника эксперимента*
Вопросы языкознания	Прикладная биохимия и микробиология*
Восток	Прикладная математика и механика
Вулканология и сейсмология*	Природа
Высокомолекулярные соединения (Сер. А, В, С)*	Проблемы Дальнего Востока
Генетика*	Проблемы машиностроения и надежности машин*
Геология рудных месторождений*	Проблемы передачи информации*
Геомagnetизм и аэрономия*	Программирование*
Геоморфология	Психологический журнал
Геотектоника*	Радиационная биология. Радиозология
Геохимия*	Радиотехника и электроника*
Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология	Радиохимия*
Государство и право	Расплавы
Дефектоскопия*	Растительные ресурсы
Дискретная математика	Российская археология
Дифференциальные уравнения*	Российская история
Доклады Академии наук*	Российский иммунологический журнал
Журнал аналитической химии*	Российский физиологический журнал имени И.М. Сеченова
Журнал высшей нервной деятельности имени И.П. Павлова	Русская литература
Журнал вычислительной математики и математической физики*	Русская речь
Журнал неорганической химии*	Сенсорные системы
Журнал общей биологии	Славяноведение
Журнал общей химии*	Социологические исследования
Журнал органической химии*	Стратиграфия. Геологическая корреляция*
Журнал прикладной химии*	США. Канада. Экономика - политика - культура
Журнал технической физики*	Теоретическая и математическая физика
Журнал физической химии*	Теоретические основы химической технологии*
Журнал эволюционной биохимии и физиологии*	Теория вероятностей и ее применение
Журнал экспериментальной и теоретической физики*	Теплофизика высоких температур*
Записки Российского минералогического общества	Труды Математического института имени В.А. Стеклова*
Земля и Вселенная	Успехи математических наук
Зоологический журнал	Успехи современной биологии
Известия РАН. Механика жидкости и газа*	Успехи физиологических наук
Известия РАН. Механика твердого тела*	Физика Земли*
Известия РАН. Серия биологическая*	Физика и техника полупроводников*
Известия РАН. Серия географическая	Физика и химия стекла*
Известия РАН. Серия литературы и языка	Физика металлов и металловедение*
Известия РАН. Серия математическая	Физика плазмы*
Известия РАН. Серия физическая*	Физика твердого тела*
Известия РАН. Теория и системы управления*	Физикохимия поверхности и защита материалов*
Известия РАН. Физика атмосферы и океана*	Физиология растений*
Известия РАН. Энергетика	Физиология человека*
Известия русского географического общества	Функциональный анализ и его применение
Исследование Земли из космоса	Химическая физика*
Кинетика и катализ*	Химия высоких энергий*
Коллоидный журнал*	Химия твердого топлива*
Координационная химия*	Цитология*
Космические исследования*	Человек
Кристаллография*	Экология*
Латинская Америка	Экономика и математические методы
Лесоведение	Электрохимия*
Литология и полезные ископаемые*	Энергия, экономика, техника, экология
Математические заметки*	Этнографическое обозрение
Математический сборник	Энтомологическое обозрение*
Математическое моделирование	Ядерная физика*
Микология и фитопатология	
Микробиология*	
Микроэлектроника*	
Мировая экономика и международные отношения	

\* Материалы журнала издаются группой Pleiades Publishing на английском языке



*Российская академия наук*

# ФИЗИКА ЗЕМЛИ

№ 6 2013 Ноябрь–Декабрь

Основан в 1965 г.

Выходит 6 раз в год

ISSN: 0002-3337

*Журнал издается под руководством*

*Отделения наук о Земле РАН*

*Главный редактор*

*чл.-корр. РАН С.М. Молоденский*

## Редакционная коллегия:

академик В.В. Адушкин, д-р физ.-мат. наук Л.П. Винник,  
академик А.Д. Гвишиани, академик А.О. Глико,  
д-р геол.-мин. наук А.Ф. Грачев, д-р физ.-мат. наук А.В. Гульельми,  
д-р физ.-мат. наук Г.З. Гурарий, д-р физ.-мат. наук А.В. Каракин,  
д-р физ.-мат. наук Ю.О. Кузьмин, д-р физ.-мат. наук Ш.А. Мухамедиев,  
д-р геол.-мин. наук Е.А. Рогожин, д-р физ.-мат. наук С.А. Тихоцкий,  
канд. физ.-мат. наук В.Б. Смирнов (*отв. секретарь*), чл.-корр. РАН Г.А. Соболев,  
чл.-корр. РАН А.А. Соловьев, чл.-корр. РАН В.П. Трубицын (*зам. гл. редактора*),  
д-р физ.-мат. наук В.И. Трухин, д-р физ.-мат. наук В.П. Щербаков,  
д-р физ.-мат. наук А.Н. Храмов, академик М.И. Эпов,  
д-р физ.-мат. наук А.Г. Ягола, д-р физ.-мат. наук Т.Б. Яновская

*Зав. редакцией Л.Л. Стороженко*

*Адрес редакции:* 123995, Москва, ул. Б. Грузинская, 10, ИФЗ РАН,

тел./факс: (499)254-93-41

E-mail: journal@ifz.ru

**Москва**

**Издательство “Наука”**

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/273409218>

# Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников

Article in *Физика земли* · January 2013

DOI: 10.7868/S000233371305013X

CITATIONS

0

READS

38

14 authors, including:



Vitalii V. Kolobov

56 PUBLICATIONS 227 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Vasily Selivanov

Kola Science Centre

63 PUBLICATIONS 368 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



A. A. Skorokhodov

Kola Science Centre

16 PUBLICATIONS 71 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

УДК 550.837

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ СВЕРХГЛУБОКИХ СКВАЖИН ЯНАО В ПОЛЯХ ЕСТЕСТВЕННЫХ И КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2013 г. А. А. Жамалетдинов<sup>1, 2, 3</sup>, М. С. Петрищев<sup>1</sup>, А. Н. Шевцов<sup>2</sup>, В. В. Колобов<sup>3</sup>, В. Н. Селиванов<sup>3</sup>, М. Б. Баранник<sup>3</sup>, Е. Д. Терещенко<sup>4</sup>, В. Ф. Григорьев<sup>4</sup>, П. А. Сергушин<sup>1</sup>, Е. А. Копытенко<sup>1, 5</sup>, М. А. Бируля<sup>5</sup>, А. А. Скороходов<sup>1</sup>, О. А. Есипко<sup>6</sup>, Р. В. Дамаскин<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский филиал ФГБУ науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> ФГБУ науки Геологический институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты

<sup>3</sup> Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФГБУ науки Кольского научного центра РАН, г. Апатиты

<sup>4</sup> ФГБУ науки Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, г. Мурманск

<sup>5</sup> ООО «ВЕГА», г. Санкт-Петербург

<sup>6</sup> ОАО НПЦ «Недра», г. Ярославль

<sup>7</sup> Ямало-Ненецкое предприятие магистральных электрических сетей (ПМЭС) – филиала ОАО ФСК ЕС Западной Сибири

Поступила в редакцию 01.02.2012 г.

В районе сверхглубоких скважин СГ-6 (Тюменская) и СГ-7 (Ен-Яхинская), расположенных на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), выполнены электромагнитные зондирования в полях естественных (МТЗ-АМТЗ) и мощных контролируемых источников. Зондирования с контролируемыми источниками выполнялись с применением промышленной линии электропередачи ВЛ 220 кВ «Уренгой-Пангоды» протяженностью 114 км и антенны сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения «Зевс», расположенной на удалении 2000 км от пунктов регистрации сигналов. При зондированиях с ЛЭП «Уренгой-Пангоды» в качестве источников тока использовался генератор «Энергия-2» мощностью до 200 кВт и портативный генератор «Энергия-3» мощностью 2 кВт, разработанные и изготовленные для этой цели в Кольском научном центре РАН. Зондирования с генератором «Энергия-3» выполнялись в диапазоне частот 0.38–175 Гц. Внешний генератор подключался к ЛЭП по согласованию с диспетчерской службой Ямало-Ненецкого предприятия магистральных электрических сетей (ПМЭС) – филиала ОАО ФСК ЕС Западной Сибири. Подключение выполнялось по схеме «провод–земля» в период проведения профилактических ремонтных работ на ЛЭП в ночное время. Наилучшее качество сигналов получено в районе сверхглубокой скважины СГ-7 (Ен-Яхинской), где наблюдается наиболее низкий уровень промышленных помех. Результаты решения обратной задачи по данным зондирований с применением ЛЭП и с СНЧ антенной «Зевс» полностью согласуются между собой и с данными электрического каротажа. Данные МТЗ-АМТЗ дают дополнительную информацию о глубинном разрезе в низкочастотном диапазоне (ниже 1 Гц). В разрезе СГ-6 и СГ-7 установлены проводящие слои на глубинах 0.15–0.3 км и 1–1.5 км, связываемые с изменениями литологического состава, пористости и флюидонасыщенности горных пород. На глубине порядка 7 км выявлена кровля плохопроводящих пород пермо-триасового комплекса траппов. По результатам МТ зондирования в наиболее низкочастотном диапазоне (часовые вариации и ниже), с учетом данных обсерватории Новосибирска, получено распределение удельного электрического сопротивления до глубин порядка 800 км, что может служить дополнительной информацией при расчете температурного и реологического режима литосферы и верхней мантии Западной Сибири. Результаты выполненных исследований показывают перспективность применения комплексных электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируемыми источниками для изучения глубинного строения литосферы и для прослеживания на глубине газо-нефтеперспективных горизонтов в осадочном чехле Западно-Сибирской платформы на территории ЯНАО.

DOI: 10.7868/S000233371305013X

### ВВЕДЕНИЕ

Электроразведка, наряду с сейсморазведкой обладает значительными потенциальными возможностями при поисках глубоко залегающих

полезных ископаемых. Электропроводность позволяет судить о вещественном составе, температуре и флюидном режиме земных недр. Параметр электропроводности может нести также косвенную информацию о пористости и структурной

организации токопроводящих каналов на глубине, о наличии зон частичного плавления и о реологических свойствах литосферы. Большое количество информативных признаков, наряду с широким диапазоном изменения величины удельного электрического сопротивления является достоинством и одновременно недостатком электроразведки, поскольку увеличивает неоднозначность решения обратной задачи. Существенным ограничением разрешающей способности глубинной электроразведки является диффузионная природа сигналов, ограниченных рамками квазистационарного приближения. Одним из путей повышения ее достоверности является увеличение точности определения функции отклика среды.

В этом отношении особый интерес представляют зондирования с мощными контролируруемыми источниками, обозначим их CSEMS, выполняемые в комплексе с магнитотеллурическими зондированиями (МТЗ). Главным достоинством CSEMS является то, что положение и конфигурация источника точно известны и может быть выбран оптимальный частотный диапазон зондирования. Современные мощные генераторные устройства [Велихов и др., 1994; Терещенко и др., 2008; Баранник и др., 2009] и компьютеризированные цифровые измерительные системы [Ингеров, 2011; Колотов и др., 2011; Корутенко et al., 2010] позволяют накапливать и уверенно регистрировать полезный сигнал на фоне интенсивных промышленных помех.

Однако отмеченные достоинства CSEMS снижаются такими их недостатками как высокая стоимость работ, связанная с необходимостью использования дорогостоящих генераторных устройств и питающих линий, повышенные требования к методике обработки и интерпретации результатов и ряд других [Жамалетдинов, 2012]. С учетом изложенного неудивительно, что практически всю область интересов глубинной геоэлектрики захватили методы магнитотеллурического и аудиоманнитотеллурического зондирования (МТЗ-АМТЗ) [Бердичевский, 1968]. Зондирования с мощными контролируруемыми источниками стали редким исключением. Тем не менее, быстрое развитие компьютерных технологий и разработка новых подходов в теории электромагнитных зондирований, наряду с совершенствованием аппаратной базы позволяют успешно бороться с проблемами практического применения как магнитотеллурических зондирований, так и зондирований с мощными контролируруемыми источниками. Поэтому параллельное развитие этих двух направлений, конкурирующих и взаимно дополняющих друг друга, является важным условием достижения успешных результатов. В настоящей работе представлен первый опыт проведения таких исследований, выполненных в Ямало-Ненецком автономном округе в районе сверхглубоких скважин

СГ-6 и СГ-7. Работа выполнялась в 2011 и 2012 годах Кольским Научным центром РАН с участием СПбФ ИЗМИРАН и ООО “ВЕГА” при содействии администрации ЯНАО и Ямало-Ненецкого предприятия магистральных электрических сетей (ПМЭС) – филиала ОАО ФСК ЕС Западной Сибири.

## ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований показан на рис. 1а, где приведено положение высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП) “Уренгой-Пангоды” и штрих-пунктирными контурами 1 и 2 отмечены районы, доступные для электромагнитного зондирования при подключении к ВЛ “Уренгой-Пангоды” генератора “Энергия-2” мощностью до 200 кВт (контур 1) и портативного генератора “Энергия-3” мощностью 2 кВт (контур 2). На рис. 1а отмечено также положение сверхглубоких скважин СГ-6 (Тюменская) и СГ-7 (Ен-Яхинская) и выделены основные газо-перспективные участки на территории ЯНАО. Справа, на рис. 1б показано положение точек зондирования с естественными и контролируемыми источниками на удаленностях от 25 до 110 км относительно ВЛ “Уренгой-Пангоды” и в поле СНЧ-антенны “Зевс”.

Скважина СГ-6 (забой на глубине 7502 м) находится в 60 км к востоку от гигантского Нижне-Уренгойского месторождения газа, в области положительных потенциальных (гравитационных) полей [Мегеря и др., 2012]. Месторождение приурочено к Уренгойскому валу, установленному по данным электроразведки методом магнитовариационного профилирования в начале 60-х годов [Бердичевский, 1968]. Скважина СГ-6 вскрыла наиболее полный разрез раннеюрских и пермотриасовых отложений. Однако, не достигла палеозойского фундамента, что не позволило оценить его газо-нефтеперспективность. Бурение СГ-6 по техническим причинам завершено в 1994 году [Есипко и др., 2000].

Скважина СГ-7 забурена в 2000 году на месторождении Большой Уренгой, на Песцовом валу в 160 км к северо-западу от СГ-6, в зоне отрицательных гравитационных полей. На ней достигнута рекордная для осадочных бассейнов России глубина 8250 м. На глубине 6920 м скважина вошла в щелочные кайнотипные эффузивы (базальты) пермо-триасовой трапповой формации, аналогичные траппам Сибирской платформы [Горбачев и др., 2007; Хахаев и др., 2008]. В скважине СГ-6 базальты трапповой формации встречены на несколько меньшей глубине 6500 м. На рис. 2 приведены результаты электрического каротажа (обозначены кружком 1), осредненная кривая пористости горных пород по керну скважины (обозначена кружком 2). В правых частях рис. 2а и 2б

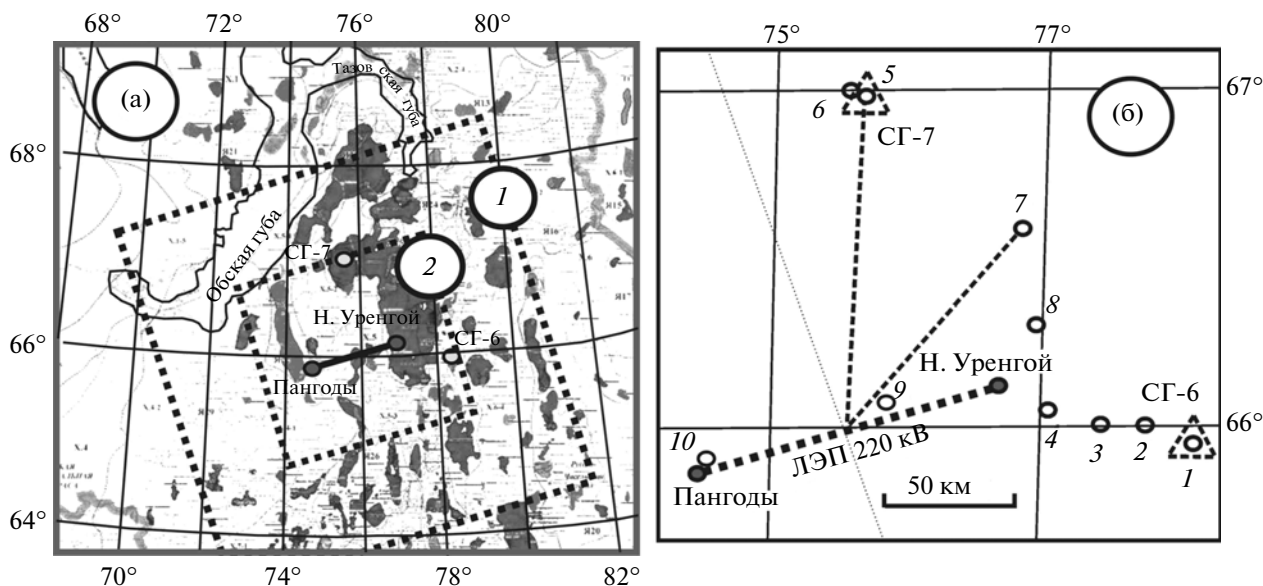


Рис. 1. Схема района работ:

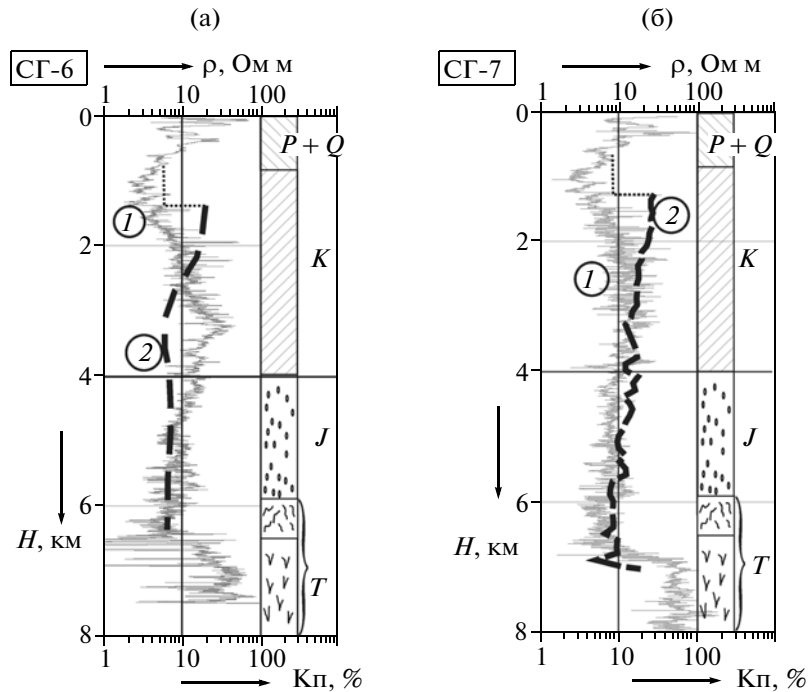
(а) – расчетные контуры районов, доступных для глубинного зондирования при подключении к ЛЭП “Уренгой-Пангоды” генератора “Энергия-2” (1) и генератора “Энергия-3” (2). Темными пятнами обозначены газо-перспективные области; (б) – положение пунктов зондирования в поле ЛЭП “Уренгой-Пангоды” с генератором “Энергия-3” (1–8) и положение сверхглубоких скважин СГ-6 и СГ-7. Точки 9 и 10 – пункты АМТ-МТЗ.

приведены сводные колонки геологических разрезов по обоим скважинам.

Проведем описание геологического разреза и данных каротажа на примере скважины СГ-6 [Есипко и др., 2000]. Описание СГ-6 может быть отнесено также и к скважине СГ-7 [Горбачев и др., 2007] вследствие сходства их геологических разрезов и параметров каротажных данных (рис. 2), несмотря на значительное расстояние между ними (160 км). В целом разрез обеих скважин делится на осадочный и вулканогенно-осадочный комплексы. Граница между двумя комплексами, зафиксированная в скважине СГ-6 на глубине 6424 м и в скважине СГ-7 на глубине 6921 м, характеризуется резким увеличением удельного электрического сопротивления почти в 10 раз (рис. 2). Самая верхняя часть разреза от дневной поверхности и до глубины 400 м характеризуется чередованием песчаных и глинистых прослоев палеоген-четвертичного возраста. В разрезе СГ-6 выделяется слой пониженного сопротивления (5–7 Ом м) на глубине 200 м. Тот же слой, но более мощный, в скважине СГ-7 выделяется на глубине порядка 150 м. В интервале глубин от 400 до 1380 м в разрезах обеих скважин наблюдается широкий интервал понижения электрического сопротивления пород с 20–30 Ом м до 2–3 Ом м. В геологическом отношении этот интервал глубин приходится на область региональной покрывки (флюидоупора), сложенной слабо проницаемыми для флюидов глинами палеогеново-верхнемелового возраста, обладающих, по видимому, пониженной

пористостью, что и показано пунктиром на рис. 2. Ниже, в интервале 1380–2700 м залегает зона развития поровых коллекторов с межзерновой пористостью до 15–25%, перспективных на скопление газа. На диаграмме электрического каротажа область высокой пористости отмечается увеличением удельного электрического сопротивления с глубиной до 10–15 Ом м (рис. 2). Ниже, в интервале глубин 2.7–4.3 км пористость снижается до 6–8% а сопротивление при этом увеличивается до 20–30 Ом м. Характер связи удельного сопротивления и проницаемости пород по данным каротажа скважины СГ-7 имеет примерно тот же характер, что и в скважине СГ-6, но менее выразительный.

Из рис. 2 и приведенного описания можно отметить необычный характер связи сопротивления и пористости пород в верхней части разреза, где anomalously высокая пористость (до 25%) сопровождается градиентным увеличением сопротивления пород с глубиной (с 2–3 до 10–15 Ом м), несмотря на то, что из самых общих физических соображений увеличение пористости должно было сопровождаться уменьшением сопротивления вследствие увеличения процентного содержания хорошо проводящих флюидов. В качестве объяснения данного феномена можно предположить, что повышение пористости сопровождается снижением качества и количества каналов связи между проводящими порами и капиллярами. Это, в свою очередь, может привести к увеличению сопротивления породы в целом при увеличении пористости. Однако, возможна и другая



**Рис. 2.** Результаты электрического каротажа сверхглубоких скважин СГ-6 (а) (Тюменской) и СГ-7 (б) (Ен-Яхинской) методом потенциал-зонда (ПЗ).

*P + Q* – палеоген-четвертичные отложения; *K* – карбон; *J* – юра; *T* – триас. Тонким пунктиром на кривой 2 показана нижняя граница региональной покрывки (флюидоупора), сложенной слабо проницаемыми для флюидов глинами палеоген-верхнемелового возраста.

трактовка. С увеличением пористости сопротивление может увеличиться за счет увеличения содержания в коллекторе газовой-нефтяной смеси или за счет уменьшения концентрации соли в электролите, что также ведет к увеличению сопротивления пород. Отметим, что поровые воды характеризуются минерализацией 5.5 г/л, что соответствует удельному сопротивлению водного раствора порядка 1.5 Ом м [Дахнов, 1953]. Глубже 2.7 км характер связи между сопротивлением пород и их пористостью носит инверсный характер, то есть сопротивление пород увеличивается с уменьшением пористости и наоборот согласно общим физическим закономерностям, описанным в [Дортман, 1984]. В качестве главного результата электрического каротажа скважин СГ-6 и СГ-7 можно отметить экспериментальный факт наличия в разрезе участка, где более перспективному, высоко пористому пласту с повышенными коллекторскими свойствами соответствует область повышенного электрического сопротивления. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о перспективности использования глубинной электроразведки в комплексе с другими геофизическими методами для оценки нефтегазоносности осадочного чехла.

Важным результатом бурения скважин СГ-6 и СГ-7 явилось получение сведений о строении и нефтегазоносности залегающих под осадочным чехлом эффузивно-осадочных, вулканогенных отложений севера Западно-Сибирской провинции. Разрез эффузивно-осадочной толщи нижнего триаса-верхней перми в верхней части представлен переслаиванием мелкозернистых базальтов и спекшихся туфов коротчаевской свиты (6921–7078 м) с тонкими слоями кремнистых осадочных пород – силицитов аймальской свиты (7078–7194 м). Аналогичная картина наблюдается и в разрезе эффузивных образований, вскрытых Тюменской скважиной СГ-6 [Горбачев и др., 2007]. В интервале 7194–7418 м разрез сложен переслаиванием базальтов и спекшихся вулканических туфов. Ниже по разрезу СГ-7, вплоть до отметки 8248 м встречаются слои чисто осадочных пород – аргиллитов. На основании этого сделан вывод о частой смене водного и наземного режимов накопления вулканитов пермо-триасового траппового комплекса. Полученные результаты подтвердили региональный характер распространения эффузивного триасового комплекса траппов, сложенного в верхней части туфолавами, ниже которых залегает мощная толща базальтов. В трапповом комплексе, наряду с низкочемными

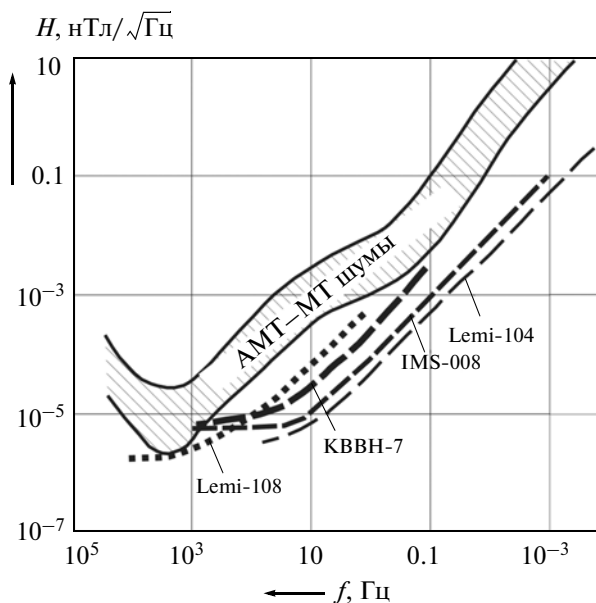


разностями массивных пород присутствуют интервалы высокопористых коллекторов поро-трещинного типа ( $k_n = 15-20\%$ ). Все это позволяет сделать вывод о перспективности обнаружения скоплений газа и нефти в глубоких горизонтах ЯНАО (глубже 5–6 км) и выдвинуть гипотезу о регенерации газо-нефтяных месторождений за счет поступления УВГ из залегающих ниже палеозойских отложений [Есипко и др., 2000; Горбачев и др., 2007]. Решение этих задач целесообразно вести с применением комплекса геофизических методов, включающих сейсморазведку и глубинные электромагнитные зондирования.

### МЕТОДИКА

Электромагнитные зондирования проводились в два этапа. На первом этапе, в 2011 году выполнены измерения сигнала антенны сверхвысокочастотного (СНЧ) излучения “Зевс”, расположенной на Кольском полуострове [Велихов и др., 1994] и аудиоманнитотеллурические и магнитотеллурические зондирования (АМТ-МТЗ) в поле естественных вариаций электромагнитного поля в районе скважин СГ-6 и СГ-7. Эта работа проводилась под кодовым названием “НУР-2011”. В следующем, 2012 году выполнены опытные работы по частотному зондированию с применением промышленной ЛЭП “Уренгой-Пангоды” путем подключения к ней генератора “Энергия-2” мощностью до 200 кВт (июнь 2012 года) и портативного генератора “Энергия-3” мощностью 2 кВт (сентябрь 2012 года). Результаты работ 2012 года в настоящей статье описаны, главным образом, в части зондирований с портативным генератором и получили кодовое название “НУР-2012”, где НУР – аббревиатура города Новый Уренгой. Полное описание результатов 2012 года, включая зондирования с генератором “Энергия-2” мощностью до 200 кВт, будет приведено в следующей публикации.

Регистрация сигналов естественных и контролируемых источников в 2011 году осуществлялась с применением семиканальной цифровой станции КВВН-7 [Колобов и др., 2011]. Для повышения надежности наблюдений и расширения частотного диапазона магнитное поле измерялось с применением двух комплектов индукционных датчиков, подключаемых одновременно к пяти магнитным входам станции. Три датчика ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) разработки Нижегородского института радиофизических исследований (НИРФИ) входят в комплект станции КВВН-7. Их частотный диапазон находится в пределах от 1000 до 0.1 Гц. Дополнительно использовались два широкодиапазонных датчика IMS-008 ( $H_x$ ,  $H_y$ ) фирмы ООО “ВЕГА”. Их частотный диапазон находится в пределах от 1000 до 0.001 Гц. Шумовые характеристики тех и других магнитных датчиков приведены на рис. 3

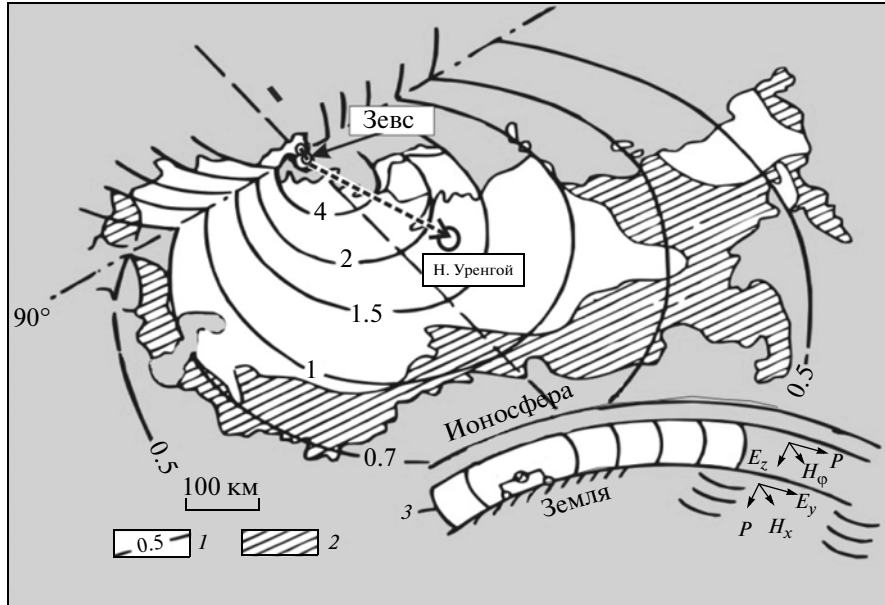


**Рис. 3.** Сводная диаграмма спектральных характеристик собственных шумов индукционных датчиков магнитного поля (КВВН-7, IMS-008 и датчики серии LEMI) в сопоставлении со средним уровнем естественных шумов (заштрихованная полоса). Расшифровка станций и ссылки на источники приведены в тексте.

в сопоставлении с зарубежными магнитометрами серии LEMI разработки Львовского Института космических исследований (Украина) [Корепанов и др., 2006]. Можно видеть, что характеристики датчиков IMS-008 во всем диапазоне частот находятся ниже уровня естественных шумов, показанных на рис. 3 заштрихованной полосой. Собственные шумы датчиков станции КВВН-7 в районе 0.1 Гц приближаются к полосе естественных шумов и перестают быть пригодными для уверенной регистрации слабых низкочастотных МТ-вариаций.

Регистрация электрического поля осуществлялась с помощью двух несимметричных Г-образных заземленных линий  $MN$ , подключаемых к дифференциальному входу станции с общей “землей”. Длины линий  $MN$  находились в пределах 300–500 м. Горизонтальные магнитные датчики и электрические линии устанавливались по магнитному меридиану ( $H_x$ ,  $E_x$ ) и по магнитной широте ( $H_y$ ,  $E_y$ ).

Передачик “Зевс” (рис. 4) состоит из двух свитч-генераторов синусоидального напряжения мощностью по 1 МВт и двух параллельных горизонтальных заземленных антенн (аналог заземленных промышленных ЛЭП) длиной по 55–60 км каждая [Велихов и др., 1994]. Генераторы обеспечивают ток в антеннах до 200–300 А в диапазоне частот от 40 до 200 Гц. Электромагнитное поле ис-



**Рис. 4.** Положение СНЧ-антенны “Зевс” и района исследований (Н. Уренгой); 1 – изолинии теоретически рассчитанного горизонтального магнитного поля  $H_\phi$  в нанотеслах на частоте 100 Гц при силе тока в антенне 100 А; 2 – районы повышенной сейсмической опасности; 3 – схема распространения СНЧ-поля в волноводе “Земля-ионосфера” и в нижнем полупространстве.

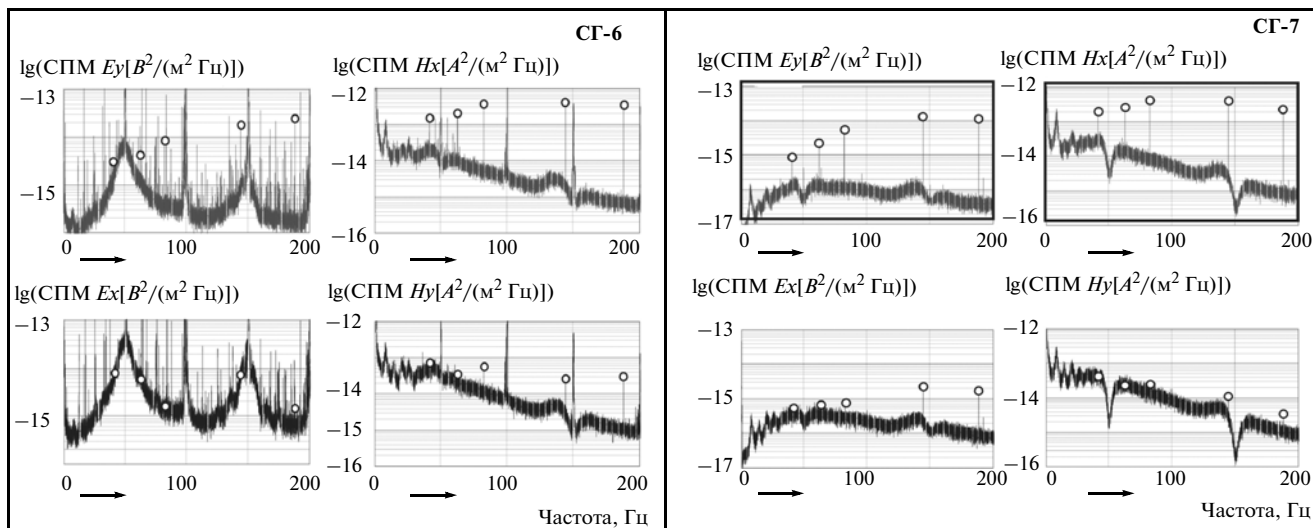
точника “Зевс” распространяется в волноводе Земля-ионосфера в виде вертикально поляризованной, поперечно-электрической  $TE$ -моды [Бернстайн и др., 1974; Акиндинов и др., 1976]. Она включает продольную относительно границ волновода горизонтальную компоненту  $H_\phi$  и поперечно-вертикальную электрическую компоненту  $E_z$ . Стрелкой  $P$  на рис. 4 показано направление вектора Умова-Пойнтинга. На границе дневной поверхности компонента  $H_\phi$ , в силу граничных условий Леонтовича, порождает электрическое поле в земле, ориентированное вдоль направления заземленной питающей линии АВ (широтная компонента  $E_y$  на рис. 4). При этом часть энергии рассеивается в нижнем полупространстве в виде плоской электромагнитной волны при условии  $\lambda_0 \gg \lambda_z$ , где  $\lambda_0$  и  $\lambda_z$  длины волн в воздухе и в земле, соответственно. Интенсивность горизонтального поля  $E_y$  определяется входным импедансом нижнего полупространства  $Z_3$  и интенсивностью поля  $H_\phi$ , пришедшего от излучателя. На поверхности земли компонента  $H_\phi$  обозначена как  $H_x$ ,

$$E_y = Z_3 H_x, \text{ где } |Z_3| = \sqrt{\rho_3 \omega \mu_0}.$$

Изучая входной импеданс на поверхности слоистого нижнего полупространства  $Z_3 = E_y/H_x$  на разных частотах, можно проводить глубинное зондирование Земли в поле СНЧ-антенны.

Важной особенностью антенн источника “Зевс” на Кольском полуострове является их расположение на поверхности однородного плохопроводящего блока, сложенного гранито-гнейсами древнейшего протофундамент (Мурманский блок). Эффективное удельное электрическое сопротивление  $\rho$  среды под антенной составляет в среднем  $5 \times 10^4$  Ом м. Это означает, что на средней частоте 100 Гц горизонтальный магнитный момент антенны  $M = J L h_s$  достигает  $1.5 \times 10^{11}$  А м<sup>2</sup>, где  $J$  – сила тока в амперах,  $L$  – длина антенны в

метрах и  $h_s = \sqrt{\frac{10^7 \rho}{f 8 \pi^2}}$  – толщина скин-слоя под антенной, достигающая на Мурманском блоке 10 км на частоте 100 Гц. Ход задающего кварцевого генератора определяется системой “Гиацинт” с точностью не хуже  $10^{-7}$  с. Источник “Зевс” во время проведения эксперимента включался по заданной программе на 5 частотах – 41 Гц (195 А), 62 Гц (180 А), 82 Гц (215 А), 144 Гц (160 А) и 188 Гц (150 А), по 5–10 минут на каждой частоте. В скобках указаны средние значения силы тока. Ток в антенне “Зевс” на всех частотах имеет синусоидальную форму. На рис. 4 приведены теоретически рассчитанные изолинии азимутальной компоненты магнитного поля  $H_\phi$  в сферической системе координат на частоте 100 Гц при силе тока 100 А. Судя по диаграмме направленности изолиний поля  $H_\phi$ , можно видеть, что район исследований (Н. Уренгой) находится в благоприятной зо-



**Рис. 5.** Диаграммы спектров плотности мощности электрического и магнитного поля по результатам регистрации сигналов СНЧ-антенны “Зевс” в районе скважин СГ-6 и СГ-7. Амплитуды сигналов источника “Зевс” показаны кружочками на частотах зондирования. Положение источника “Зевс” и пунктов приема показано на рис. 1 и рис. 4.

не излучения антенны, близко к оси источника. Компоненте  $H_\phi$  в районе Нового Уренгоя соответствует меридиональная компонента  $H_x$  в географических координатах. Такую же диаграмму направленности имеет радиальная компонента электрического поля  $E_r$ , которой в нашем районе наблюдений соответствует широтная компонента  $E_y$  (рис. 4). Более подробное описание поля источника “Зевс” по экспериментальным наблюдениям дано в следующем разделе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СНЧ-АНТЕННЫ “ЗЕВС”

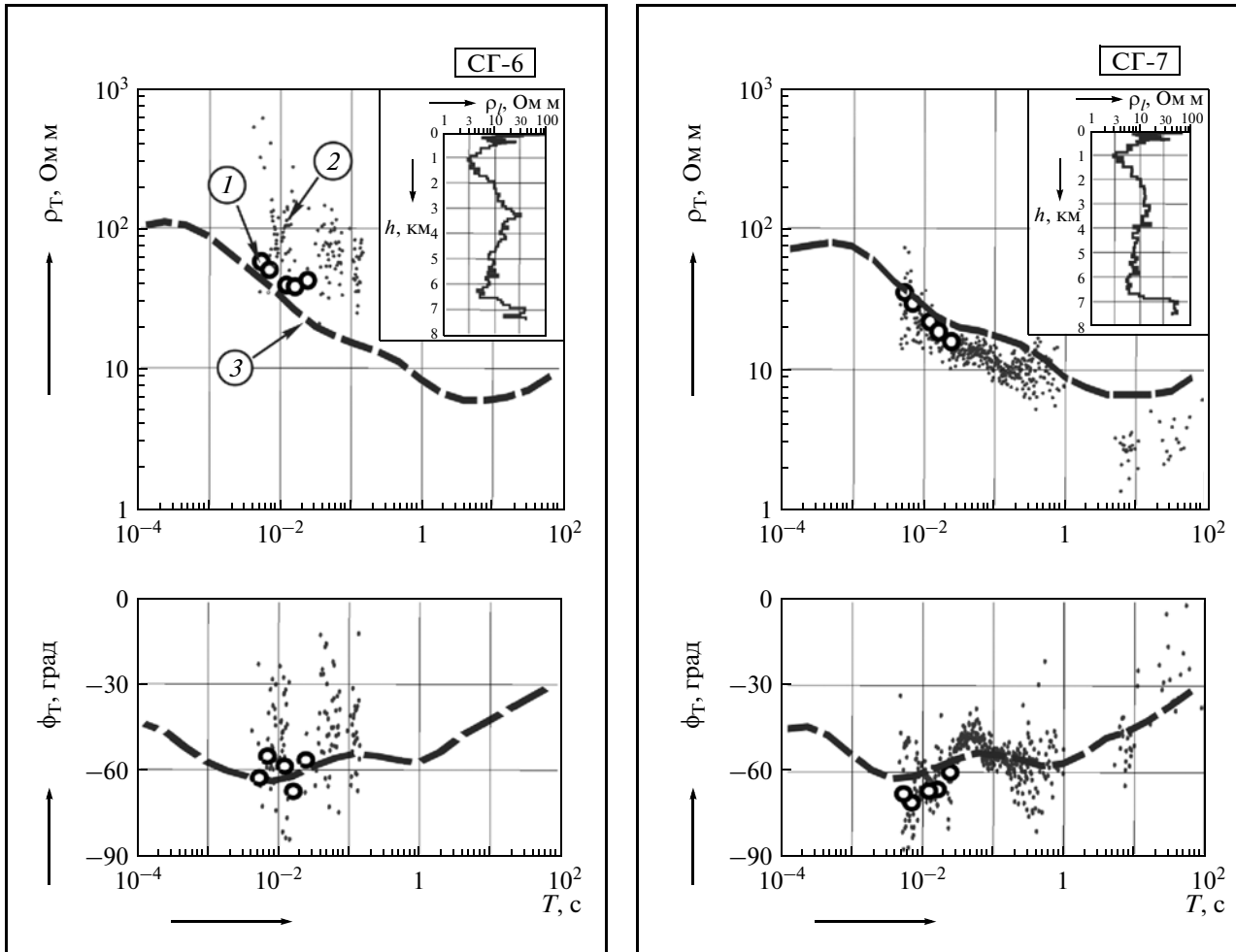
Результаты регистрации сигналов СНЧ-источника “Зевс” приведены на рис. 5 в виде диаграмм спектра плотности мощности (СПМ) для электрических и магнитных компонент поля. Спектральная обработка выполнена с применением программы Power Graph. Сигналы уверенно зарегистрированы в районе обеих скважин на обоих комплектах магнитных индукционных датчиков КВВН-7 и IMS-008 с одинаковой погрешностью. В районе сверхглубокой скважины СГ-6 уровень помех значительно выше по сравнению с полем помех, наблюдаемым в районе СГ-7, особенно по электрическому полю. Резкое преобладание шумов по электрическому полю над шумами по магнитному полю в районе скважины СГ-6 свидетельствует об их гальванической природе. Как следствие это приводит к снижению коэффициента когерентности между сопряженными компонентами электромагнитного поля как естественного, так и искусственного происхождения.

Из рассмотрения рис. 5 можно отметить также резкое преобладание компонент поля  $E_y$  и  $H_x$  над компонентами  $E_x$  и  $H_y$  на обоих пунктах регистрации. Такое поведение поля хорошо согласуется с теоретическими представлениями о том, что поле длинной заземленной линии в области преобладающего влияния ионосферы и токов смещения вытянуто вдоль ее оси [Бернштейн и др., 1974; Акиндинов и др., 1996]. На диаграммах СПМ (рис. 5) можно видеть, что интенсивность сигнала по магнитному полю практически не изменяется с удалением от источника, а по электрическому полю сигнал в районе скважины СГ-6 даже сильнее на 30% в сравнении с СГ-7, расположенной на 160 км ближе к источнику. Такое поведение поля хорошо объясняется более высоким сопротивлением верхней части разреза в районе СГ-6 (рис. 2). Полная амплитуда измеренных сигналов на рис. 5 может быть определена непосредственно из графиков СПМ, пользуясь выражением

$$E = \sqrt{\text{СПМ}_E \Delta f}, [\text{В/м}] \text{ и } H = \sqrt{\text{СПМ}_H \Delta f}, [\text{А/м}].$$

Шаг по частоте  $\Delta f = 0.002$ , Гц, отсюда из графиков СПМ нетрудно определить, что средние измеренные значения напряженности основных компонент поля находятся в пределах 2–12 мкВ/км для компоненты  $E_y$  и 32–66 фТл для компоненты  $H_x$ .

Обработка сигналов СНЧ-антенны “Зевс” и вариаций естественного АМТ-МТ поля производилась двумя творческими коллективами. В настоящем разделе приведены результаты обработки по программе, разработанной А.Н. Шевцовым [2006]. Обработка выполнялась методом Уэлча на основе БПФ с разными окнами и перекрытиями



**Рис. 6.** Сводные диаграммы кажущегося сопротивления по результатам обработки сигналов источника “Зевс” (1) и по результатам АМТ-МТ зондирования (2) в сопоставлении с решением прямой задачи АМТ-МТЗ (3) для геоэлектрических разрезов каротажа скважин СГ-6 и СГ-7.

Разрезы СГ-6 и СГ-7 приведены в правых верхних углах соответствующих диаграмм.

фрагментов записи. Обработка выполнена по записям с частотой дискретизации 5 кГц после прореживания с усреднением до частоты 500 Гц. Оптимальное окно, с точки зрения разрешающей способности по частоте и статистической устойчивости получаемых оценок, обеспечивающее 40% перекрытие фрагментов получено для частоты дискретизации 500 Гц при  $2^{18}$  отсчетах. В качестве весовой функции использовалась функция Блэкмана-Харриса. Рассчитывались оценки спектральной плотности мощности для каждой компоненты и оценки взаимных спектральных мощностей пар компонент. Полученные таким образом оценки использовались для вычисления частных когерентностей и передаточных функций (импедансов) [Семенов, 1985]. По ним определялись значения кажущегося сопротивления ( $\rho_T$ ) и фазо-

вые сдвиги между компонентами поля (фаза импеданса) на заданных частотах. Выбор представительных значений сопротивления и фазы для последующей обработки проводился по условию когерентности — среднегеометрическое когерентностей коллинеарных компонент электрического и магнитного поля должно быть не больше 0.4, а среднегеометрическое когерентностей взаимно ортогональных компонент электрического и магнитного поля не меньше 0.6.

Результаты обработки зондирований с естественными и контролируемыми источниками приведены на рис. 6 и обозначены цифрами 1–3 в кружках. Там же приведены результаты решения прямой задачи для геоэлектрических разрезов, построенных по данным каротажа скважин СГ-6 и СГ-7 (штриховые линии, обозначенные циф-

рой 3 в кружке). Заметим, что решения прямой задачи выполнены для разрезов, построенных по значениям продольного удельного электрического сопротивления  $\rho_l$ . Кривые  $\rho_l$  для СГ-6 и СГ-7 рассчитаны по каротажным данным для тока, протекающего горизонтально, вдоль преимущественного направления слоистости пород, что соответствует индукционной (полоидальной) природе возбуждения вторичного поля в дальней (плосковолновой) зоне как естественных, так и контролируемых источников [Ваньян, 1965]. Значения  $\rho_l$  определялись путем пересчета каротажных данных с переменным интервалом осреднения. Для самой верхней части разреза (выше 80 м), где нет надежных данных каротажа, поскольку диаметр скважины составляет 720 мм и преимущественное влияние на результаты измерений оказывает проводящий буровой раствор, принято среднее удельное сопротивление разреза 70 Ом м для СГ-7 и 100 Ом м для СГ-6. В интервале глубин от 80 до 500 м принят шаг осреднения 20 м. Глубже 500 м вплоть до забоя принят шаг осреднения 100 м. Пересчет в значения продольного сопротивления производился по приведенному ниже алгоритму.

$$\rho_{li} = \frac{\Delta Z}{\Delta S_i}, \text{ где } \Delta S_i = \int_{Z_i-0.5\Delta Z}^{Z_i+0.5\Delta Z} \frac{1}{\rho_k(Z)} \delta Z;$$

где  $\Delta Z$  – шаг осреднения (20 и 100 м);  $Z_i$  – глубина до середины текущего шага осреднения;  $\delta Z = 2$  м – шаг оцифровки значений  $\rho_k(Z)$  по глубине на каротажной диаграмме;  $Z$  – текущая глубина отсчетов.

Полученные по каротажным данным разрезы продольного электрического сопротивления приведены в верхних правых частях диаграмм на рис. 6. Соответствующие им теоретические кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса, полученные по результатам решения прямой задачи, обозначены цифрой 3 в кружке на рис. 6.

Значения кажущегося сопротивления по результатам измерений поля источника “Зевс” на рис. 6 обозначены под номером 1 в кружке. Заметим, что значения кажущегося сопротивления источника “Зевс” могут быть определены непосредственно из диаграмм спектральной плотности мощности, представленных на рис. 5, с помощью формулы.

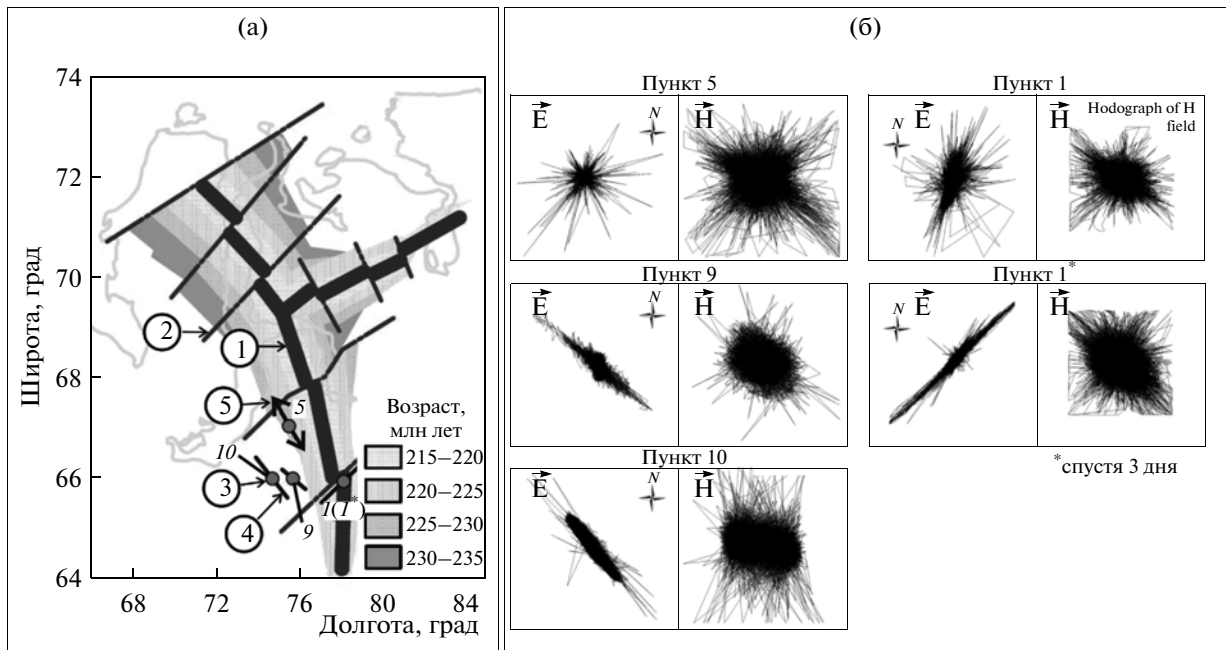
$$\rho_T = \frac{|Z_{yx}|^2}{\omega \mu_0} = 0.127T \frac{\text{СПМ}_{E_y}}{\text{СПМ}_{H_x}} \times 10^6, [\text{Ом м}].$$

Полученные таким образом значения кажущегося сопротивления хорошо совпадают с данными статистической обработки (1 на рис. 6). Общий анализ результатов на рис. 6 показывает, что

в районе малых шумов (в районе СГ-7) зондирования с естественными (АМТ-МТЗ) и контролируемыми источниками удовлетворительно совпадают между собой и с данными электрического каротажа. В районе сильных промышленных помех (в районе СГ-6) зондирования АМТ-МТЗ характеризуются сильным разбросом, тогда как данные зондирования с контролируемым источником “Зевс” на высоких частотах (188–82 Гц) хорошо согласуются с данными каротажа. Только на двух нижних частотах (62 и 41 Гц) значения кажущегося сопротивления в районе СГ-6 отклоняются в область более высоких значений под влиянием помех.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ АМТ-МТ ДАННЫХ

На рис. 7б приведены годографы концов векторов электрического и магнитного поля естественных АМТ-МТ вариаций за время регистрации сигналов на четырех пунктах (порядка 40 минут). На пунктах 1, 9 и 10 электрическое поле оказалось линейно поляризовано и только в пункте 5 электрическое поле имеет эллиптическую, близкую к круговой поляризацию, благоприятную для АМТ обработки. В отличие от электрического, магнитное поле на всех точках имеет эллиптическую поляризацию. Положение осей линейной поляризации электрического поля сопоставлено на рис. 7а со схемой возраста палеозойской коры [Аглонов, 2000], где указано положение осевой линии Обского палеорифта и трансформных разломов. Пункт 1, согласно этой схеме, находится в зоне сложного тектонического узла, причем направление поляризации электрического поля совпало с направлением трансформного разлома. Пункты 9 и 10 находятся к западу от осевой линии рифта и направление поляризации электрического поля здесь субпараллельно его простиранию. Пункт 5, хоть и находится в похожих условиях с пунктами 9 и 10, однако на нем не наблюдается линейной поляризации электрического поля. Примечательно, что при зондировании в районе СГ-6 особенно жесткая линейная поляризация электрического поля проявилась при повторном зондировании 1а. Это может быть связано с изменением положения источника помех (наблюдения выполнены в разное время суток) или с техническими особенностями записи. Поэтому обработка данных выполнена по наблюдениям первого сеанса, за 23 сентября. Но и она не привела к получению устойчивых результатов. Общий анализ результатов обработки позволяет заключить, что выполнить обработку МТ-АМТ данных в рамках приближения к модели плоской волны можно только на пункте 5, расположенном вблизи Ен-Яхинской сверхглубокой скважины СГ-7.



**Рис. 7.** Положение пунктов АМТЗ на схеме возраста палеозойской коры [Аплонов, 2000] – (а) и годографы векторов электрического ( $\vec{E}$ ) и магнитного ( $\vec{H}$ ) поля на пунктах зондирования – (б).

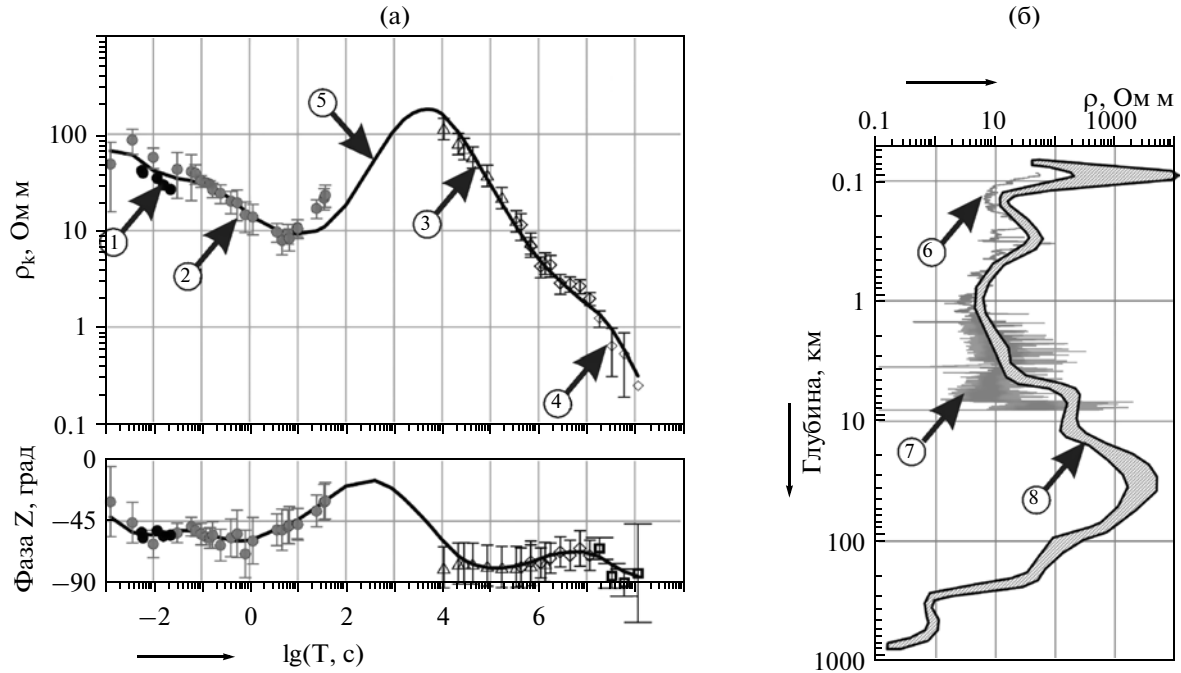
Цифры в кружках: 1 – положение оси Обского палеорифта; 2 – оси трансформных разломов; 3 – пункты МТ-АМТ зондирования; 4 – направления осей линейной поляризации электрического поля; 5 – выбранное главное направление матрицы импеданса в точке 2, расположенной в районе скважины СГ-7.

В районе сверхглубокой скважины СГ-7, как уже отмечалось выше, наблюдается самый низкий уровень техногенных помех (рис. 5). Обработка МТ-АМТ данных выполнена по программе PTS (авторская группа М. Петришев, А. Ткачев и В. Семенов). В процессе обработки оценивалась связь между спектрами компонент электромагнитного поля по уровню когерентности [Семенов, 1985] и выбирались направления, в которых дополнительные компоненты тензора сопротивлений отсутствуют или пренебрежимо малы. После того как направление определено, осуществлялось скольжение по реализации с целью статистического набора оценок. Скольжение осуществлялось с установленными порогами когерентностей, что уменьшает ошибки смещения в определении основных и дополнительных импедансов. Затем в полученном наборе значений кажущегося сопротивления определялись медианные оценки для каждого периода. Преимущество такого подхода заключается в том, что в этом случае уменьшается величина случайной ошибки.

После получения кривых МТ зондирования их можно дополнить результатами магнитовариационного зондирования, выполненного на ближайшей обсерватории, для которой известна кривая комплексного кажущегося сопротивления. Такой

подход существенно повышает устойчивость решения обратной задачи путем выполнения соответствующих инверсий и, более того, часто позволяет устранить ошибку смещения (статик-шифт) на длинных периодах кажущегося МТ сопротивления. На практике высокой эффективностью отличаются инверсии D+ [Parker, 1980] и ОССАМ [Constable et al., 1987]. Первая придает больший вес оценкам модуля кажущегося сопротивления, а вторая – его фазе. Результаты анализа данных СГ-7 показали, что предпочтительнее выполнять инверсию ОССАМ, поскольку погрешность в оценках фазы определяется, в основном, случайной ошибкой в отличие от модуля, где погрешность связана как со случайными ошибками, так и с ошибками смещения (статик-шифт).

Результаты интерпретации представлены на рис. 8. Интерпретация выполнена для  $E$ -поляризации, азимут которой составил  $\sim 30$  градусов к западу. В этом направлении получены устойчивые функции отклика в диапазоне периодов  $10^{-3}$ – $10^2$  с (кружки 2 на рис. 8а). Это направление, показанное цифрой 5 на рис. 7а, соответствует осевой линии Обского палеорифта [Аплонов, 2000]. Результаты МТ зондирования были дополнены функцией отклика ближайшей обсерватории Новосибирск (NVS) в диапазоне периодов  $4 \times 10^5$ – $10^8$  с



**Рис. 8.** Результаты эксперимента “НУР-2011” по электромагнитному зондированию в районе сверхглубокой скважины СГ-7 с применением естественных источников и поля СНЧ-антенны “Зевс”:

(а) – сводная диаграмма кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса; (б) – сопоставление результатов решения обратной задачи с данными каротажа.

Цифры в кружках: 1 – зондирования в поле СНЧ-антенны “Зевс”, 2 – АМТ-МТЗ, 3 – ГМВЗ, Новосибирск, 4 – глобальные данные; 5 – модельная кривая по результатам решения обратной задачи; 6, 7 – результаты каротажа (6 – потенциал-зонд, 7 – боковой каротаж); 8 – геоэлектрический разрез по результатам решения обратной задачи МТ-АМТ-ГМВЗ и зондирования с источником “Зевс”.

[Семенов, Харин, 1997], аналогично тому, как выполнено в работе [Semenov et al., 2008]. Интервал между этими диапазонами был частично заполнен результатами численного моделирования на сфере, выполненного Яном Возаром по программе А.В.Кувшинова [Kuvshinov et al., 2005] для обсерватории NVS по методике, описанной в работе [Vozar, Semenov, 2010].

После этого была выполнена инверсия по двум хорошо известным алгоритмам решения обратной задачи D+ [Parker, 1980] и OCCAM [Constable et al., 1987]. В D+ реализован алгоритм, позволяющий создавать идеальные геоэлектрические среды с конечным числом слоев с нулевой мощностью и конечной электропроводностью, разделенных идеальными изоляторами [Parker, 1980].

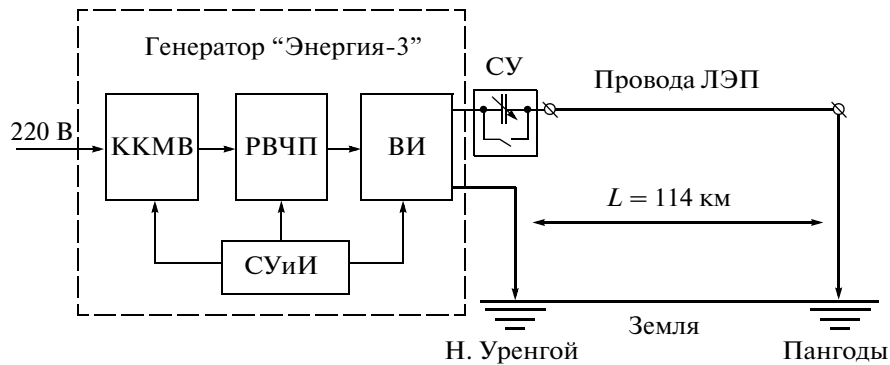
В одномерной инверсии OCCAM используется алгоритм, описанный в работе [Constable et al., 1987]. Здесь методом наименьших квадратов  $\chi^2 =$

$$= \sum_{j=1}^M \frac{(d_j - F_j[m])^2}{\sigma_j^2}$$

для данных  $d_j$  и предполагаемых среднеквадратических отклонений  $\sigma_j^2$  необходимо подобрать наиболее плоскую модель сре-

ды  $m$ , минимизируя первую  $R_1 = \int \left(\frac{dm}{dz}\right)^2 dz$  или вторую производную.

В результате выполнения инверсии для полученных кривых зондирования с разными параметрами по программе MT1D v.2.0 получена модель геоэлектрического разреза (8) на рисунке 8б. Там же нанесены результаты каротажа сопротивления в стволе скважины СГ-7 с установками вида потенциал-зонд (6) и боковой каротаж (7). Результат решения обратной задачи (8 на рис. 8б) имеет вид штриховой полосы, ширина которой показывает доверительный интервал. По результатам зондирования в стволе скважины СГ-7 в верхней части разреза (рис. 8б) выделено 2 проводящих слоя. Кривая геоэлектрического разреза здесь хорошо согласуется с данными каротажа, но смещена в сторону более высоких значений сопротивления. Первый проводящий слой находится в интервале глубин 150–200 м с удельным сопротивлением порядка 10–20 Ом м (по каротажу 7–8 Ом м). Второй слой, более мощный, расположен в интервале глубин 500–2000 м с удельным сопротивлением 6–7 Ом м (по каротажу 3–5 Ом м).



**Рис. 9.** Принципиальная схема генератора “Энергия-3” мощностью 2 кВт и порядок его подключения к источнику питания 220 В и к контурным заземлениям конечных подстанций промышленной ЛЭП “Уренгой-Пангоды” по схеме “провод-земля”.

ВФП – выпрямитель и фильтр питания, РВЧП – регулируемый ВЧ преобразователь; ВВИ – высоковольтный инвертор; СУРЗА – схема управления, регулирования, защиты и автоматики, СУ – согласующее устройство, БЗ – блок защиты от перенапряжений.

В интервале глубин 6–7 км данные каротажа и кривая геоэлектрического разреза несколько расходятся (5–20 Ом м по каротажу против 150–200 Ом м на модели 8). Вероятными причинами расхождения результатов здесь являются снижение качества экспериментальных данных в низкочастотном диапазоне периодов (первые десятки секунд) и слабая разрешающая способность метода к маломощным слабоконтрастным слоям на глубине. Глубже 7 км, где начинается мощная толща плохо проводящих базальтов, данные каротажа и МТЗ вновь хорошо согласуются. В нижней части разреза, на глубине 10–12 км выделяется ступенчатый переход от плохо проводящего траппового комплекса базальтов (150–200 Ом м) к еще более плохо проводящим породам средней части земной коры, где сопротивление экспоненциально возрастает до нескольких тысяч Ом м вследствие сокращения пористости и содержания флюидов в кристаллических горных породах. Начиная с глубин 20–30 км сопротивление коры экспоненциально убывает вследствие влияния возрастающей с глубиной температуры. В интервале глубин 250–400 км намечается промежуточный проводящий слой, предположительно связываемый с астеносферой.

### ЗОНДИРОВАНИЯ В ПОЛЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЛЭП “УРЕНГОЙ-ПАНГОДЫ”

Более широкий диапазон частотного зондирования (0.38–175 Гц), в сравнении с источником “Зевс” (41–188 Гц), был реализован с использованием промышленной ЛЭП 220 кВ “Уренгой-Пангоды” протяженностью 114 км (рис. 1). Переменный ток подавался от генератора “Энергия-2”

мощностью 200 кВт и от портативного генератора “Энергия-3” мощностью 2 кВт. Испытания с мощным генератором “Энергия-2” показали возможность генерации в промышленной ЛЭП тока силой до 100–120 А в диапазоне частот 0.05–188 Гц. Методика и результаты этих работ будут описаны в нашей следующей публикации. В настоящем разделе приведено описание методики и результатов работ с портативным генератором “Энергия-3” мощностью 2 кВт. Целесообразность и необходимость разработки портативного генератора и проведения опытно-методических работ с ним были обусловлены рядом технических и организационных причин. Среди них главными являются – упрощенная схема подключения портативного генератора “Энергия-3” к источникам собственных нужд и к самой ЛЭП (по сети 220 В), оптимальная электромагнитная совместимость тока портативного генератора с линиями связи и с подземными коммуникациями, низкие весогабаритные параметры, благоприятные для оперативной доставки генератора к месту работ и пр. Достаточно отметить, что вес портативного генератора “Энергия-3” составляет 10 кг, тогда как сила тока, развиваемого им в ВЛ “Уренгой-Пангоды”, достигает 10–12 А. Аналогичные показатели для генератора “Энергия-2” составляют 100–120 А при весе 1000 кг. Необходимость применения генератора того или иного типа зависит от конкретных задач и требуемой дальности наблюдений. На рис. 1а показаны рекомендуемые площади глубинных электромагнитных зондирований с применением генератора “Энергия-2” (контур 1, он охватывает площадь порядка 200 тыс. кв. км) и с применением портативного генератора “Энергия-3” (контур 2 площадью до 40 тыс. кв. км).



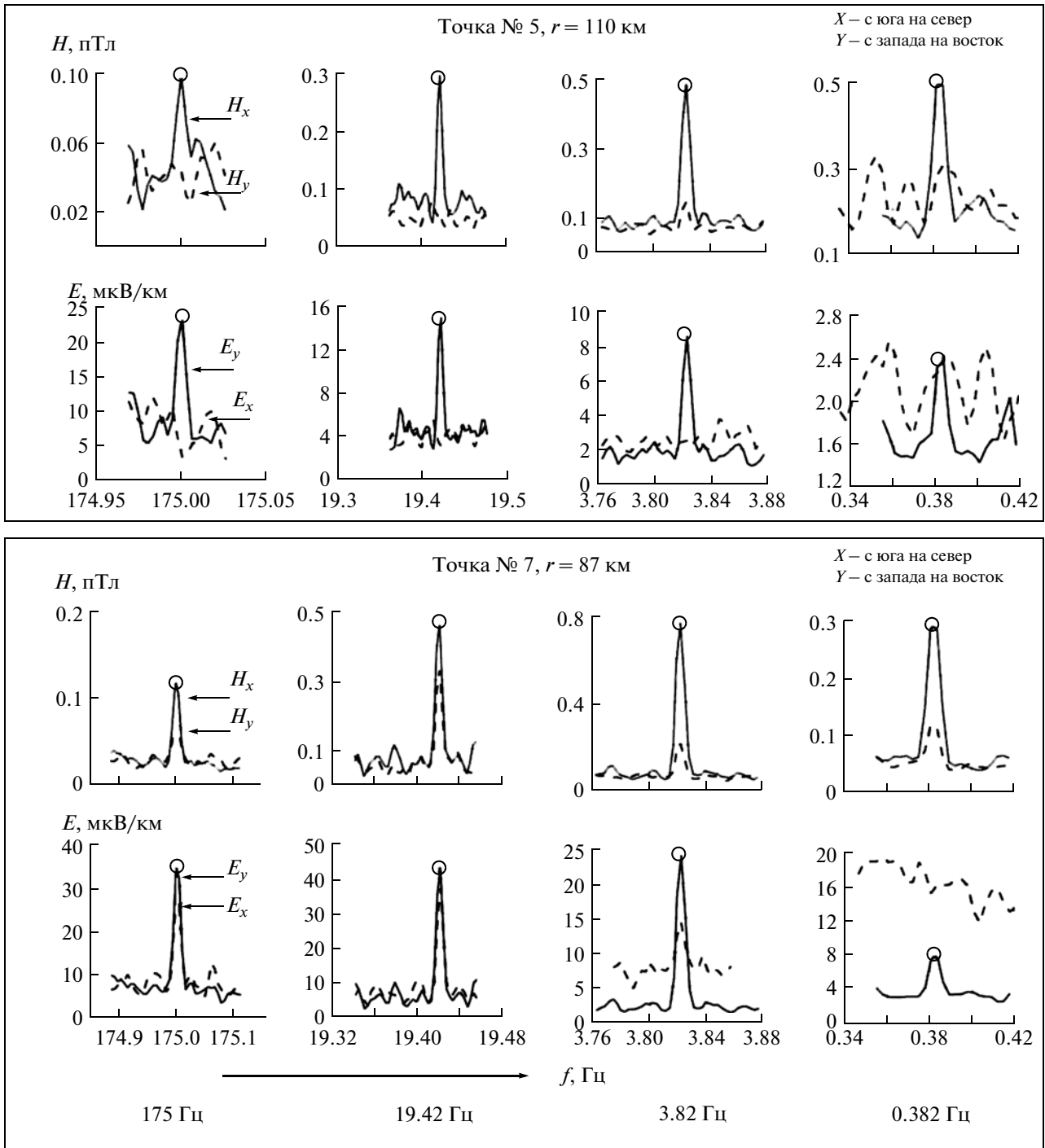
Структурная схема портативного КНЧ-СНЧ генератора “Энергия-3” и схема подключения его к ВЛ “Уренгой-Пангоды” приведены на рис. 9. Основу генератора составляет выходной инвертор (ВИ), формирующий в линии электропередачи (ЛЭП) ток синусоидальной формы, произвольной амплитуды и частоты. Принцип формирования выходного синусоидального тока основан на методе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), подробно рассмотренном в [Баранник и др., 2009]. При необходимости форма тока, формируемая ВИ, может быть изменена на произвольную (меандр, треугольник). Согласующее устройство (СУ) предназначено для компенсации индуктивной составляющей полного сопротивления линии на частотах выше 10 Гц, когда реактивное сопротивление линии начинает ограничивать силу тока в антенне. Величина емкости СУ при переходе с одной частоты генерации на другую изменяется так, чтобы всегда сохранялся резонанс напряжений в индуктивной нагрузке. При работе генератора на высоких частотах, когда используется СУ, ВИ формирует выходной сигнал прямоугольной формы (меандр), так как синусоидальность тока в линии независимо обеспечивается резонансом. При работе на низких частотах, когда необходимость в применении СУ отпадает, ВИ формирует выходной сигнал синусоидальной формы.

Измерения поля портативного генератора “Энергия-3”, подключенного к промышленной ЛЭП “Уренгой-Пангоды”, выполнены с применением двух идентичных комплектов станций VMGU-10 компании “ВЕГА” [Корутенко et al., 2010] в 8 пунктах, расположенных вдоль дорожных магистралей примерно в широтном и в меридиональном направлениях (рис. 16). В каждой точке выполнены также суточные записи МТ-АМТ поля и зондирования на постоянном токе с разносами до 500 м. Пример регистрации сигналов промышленной ЛЭП на удалении 87 и 110 км от центра линии, в точках 5 и 7 приведен на рис. 10. На удалении 110 км измерения электрического поля выполнялись с применением симметричной линии MN длиной 1 км. Можно видеть, что сигналы ЛЭП уверенно регистрируются вплоть до частоты 3.8 Гц, как по электрической, так и по магнитной компонентам. Примечательно, что амплитуда поля слабо изменяется с увеличением расстояния между источником и приемником. Выполненные расчеты показывают, что это объясняется, главным образом, за счет разной геометрии установки и частично, на самых высоких частотах, за счет влияния ионосферы.

На рис. 11 приведены результаты обработки данных частотного зондирования с портативным генератором “Энергия-3” в поле ЛЭП “Уренгой-Пангоды”, выполненного в районе СГ-7 в 2012 го-

ду (рис. 16). Можно видеть, что результаты экспериментальных измерений кажущегося сопротивления в поле двух разных типов контролируемых источников, удаленных один на 110 км (ЛЭП “Уренгой-Пангоды”, измерения 2012 года, обозначены кружком 1 на рис. 11а) и второй на 2000 км от точки приема (источник “Зевс”, измерения 2011 года, обозначены кружком 2 на рис. 11а) близко совпадают между собой и согласуются с теоретической кривой кажущегося сопротивления, рассчитанной с учетом данных каротажа СГ-7 (обозначена кружком 6 на рис. 11а). Результаты МТЗ, представленные в виде облака значений, кажущегося сопротивления (обозначено кружком 3 на рис. 11а), повторяют форму теоретической кривой 6, но смещены параллельно вниз по оси сопротивлений почти на половину порядка. Отметим, что результаты МТЗ 2011 года, представленные на рис. 8, в этом же диапазоне частот располагаются на половину порядка выше. Объясняется это тем, что в 2011 году обработка МТЗ выполнялась путем поворота системы координат в направлении, в котором дополнительные компоненты тензора сопротивлений пренебрежимо малы. Этот азимут составил 30 градусов к западу, а полученная кривая кажущегося сопротивления оказалась близка к эффективной, то есть к максимальной. В 2012 году обработка всех результатов зондирования с естественными и контролируруемыми источниками выполнена для одной и той же пары сопряженных компонент, ориентированных по магнитному меридиану (магнитное поле) и по широте (электрическое поле), что соответствует оптимальной ориентировке полей измеренных контролируемых источников.

При обработке результатов эксперимента 2012 года в решение обратной задачи было введено методическое усовершенствование. Оно заключается в том, что больший вес придавался результатам зондирования с контролируемыми источниками на самых коротких периодах (кружки 1 и 2 на рис. 11а), а также геомагнитным откликам полей естественных источников на самых длинных периодах (ГМВЗ, кружки 4 и 5 на рис. 11а). В среднем диапазоне периодов решение обратной задачи выполнялось с опорой на фазовую кривую импеданса МТЗ (обозначена кружком 7 на рис. 11а). Как известно, в диапазоне МТЗ наиболее велика опасность статических искажений, приводящих к смещению кривой кажущегося сопротивления. Фазовая кривая свободна от этого влияния, но нуждается в количественной привязке по уровню значений кажущегося сопротивления. Эта задача в принятом алгоритме решения обратной задачи выполняется с помощью отмеченной выше привязки к высокочастотным

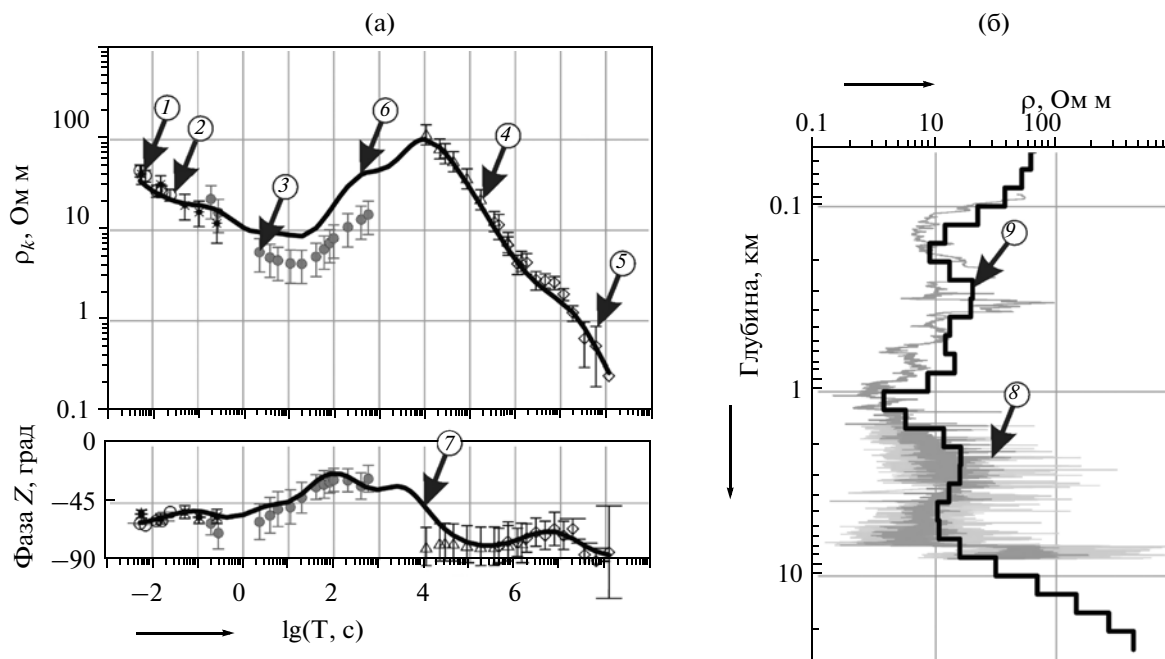


**Рис. 10.** Спектры амплитуд электрических и магнитных компонент поля по результатам измерения сигналов портативного генератора мощностью 2 кВт, подключенного к ВЛ 220 кВ “Уренгой-Пангоды”. Измерения выполнены в точках № 5 и № 7, удаленных от центра ЛЭП на 110 и 87 км, соответственно. Положение точек зондирования показано на рис. 16.

(АМТЗ) и низкочастотным (МВЗ) ветвям глубинного зондирования.

Сопоставление с материалами обработки 2011 года (рис. 8) показывает существенное преимущество новых результатов, учитывающих

данные зондирования с портативным генератором “Энергия-3” и опирающихся на новый алгоритм обработки. Подобранный разрез (обозначен кружком 9 на рис. 11б) ближе согласуется с результатами каротажа сопротивления (обозначен круж-



**Рис. 11.** Результаты эксперимента “НУР-2012” по глубинному зондированию с портативным генератором “Энергия-3” и промышленной ЛЭП “Уренгой-Пангоды” (1) в комплексе с источником “Зевс” (2) и с АМТ-МТЗ (3) и ГМВЗ (4, 5).  
 Левая диаграмма (а) – кривые кажущегося сопротивления и фазы; правая диаграмма (б) – электрические разрезы по данным каротажа (8) и по результатам зондирования (9); 4 – кривая ГМВЗ, Новосибирск; 5 – глобальные данные; 6 – модельная кривая для решения обратной задачи по модулю кажущегося сопротивления; 7 – то же по фазе импеданса; 8 – результаты каротажа СГ-7 (потенциал-зонд); 9 – геоэлектрический разрез по результатам совместного решения обратной задачи по данным зондирования с естественными источниками (МТ-АМТ-ГМВЗ) и зондирования с контролируемыми источниками (СНЧ-антенна “Зевс” и портативный генератор “Энергия-3” с промышленной ЛЭП “Уренгой-Пангоды”).

ком 8 на рис. 11б). При этом важно отметить, что модельная кривая кажущегося сопротивления (6 на рис. 11а) проходит со смещением вверх относительно экспериментальных данных магнитотеллурического зондирования (3 на рис. 11а). Это смещение может быть объяснено региональными особенностями магнитотеллурического поля, проявившимися по причине однокомпонентной обработки данных, и частично влиянием “статик-шифта”.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Полученные результаты показывают широкие возможности комплексных электромагнитных зондирований с естественными и контролируемыми источниками средней и большой мощности при изучении глубинного строения осадочного чехла нефтегазоносных территорий Ямало-Ненецкого автономного округа. В качестве контролируемых источников могут быть использованы либо поле СНЧ антенны “Зевс”, равномерно охватывающее всю территорию ЯНАО, либо относительно локальные поля промышленных ЛЭП с временно подключаемыми к ним генераторами

средней или большой мощности, в зависимости от поставленных задач. Главными преимуществами зондирований с закрепленными контролируемыми источниками являются высокая однозначность решения обратной задачи, благодаря заранее известным параметрам источника, контролируемая точность результатов и широкие возможности фильтрации полезного сигнала на фоне естественных и промышленных помех. Преимущества зондирований в полях естественных источников (АМТЗ и МТЗ) проявляются, главным образом, в низкочастотном диапазоне, ниже 0.1 Пц. Среднестатистическая интенсивность вариаций естественного поля в этом диапазоне резко возрастает с понижением частоты, тогда как накопление сигналов контролируемого источника встречается с проблемой необходимости резкого увеличения времени генерации тока. Другим преимуществом метода АМТЗ-МТЗ является то, что в нем автоматически (при соответствующей обработке) выполняется условие дальней зоны (плосковолновое приближение), что далеко не всегда выполнимо при зондированиях с контролируемыми источниками. Исключением является поле СНЧ-антенны “Зевс”,

благодаря его уникальной мощности и практически неограниченной дальности излучения.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-05-12033-офи-м-2011 (научный руководитель д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинов) и гранта ОНЗ РАН № 6 (научные руководители академики А.О. Глико и Ф.П. Митрофанов). Авторы выражают глубокую благодарность В.Ю. Семенову за ценные советы и замечания по методике обработки и интерпретации данных, признательность Яну Возару (Jan Vozar) за любезно предоставленные результаты численного моделирования функции отклика по обсерватории NVS и благодарность А.А. Петровой за полезное обсуждение результатов моделирования магнитных аномалий. Авторы выражают также признательность В.В. Плоткину за рецензирование статьи и за ценные замечания, которые были с благодарностью учтены авторами. Большую помощь в обработке данных и подготовке рукописи оказала ведущий программист ГИ КНЦ РАН Т.Г. Короткова. Особую благодарность за поддержку авторы выражают губернатору ЯНАО Д.Н. Кобылкину, д.ф.-м.н. Ю.Г. Щорсу, сотрудникам Администрации ЯНАО И.В. Петровой и А.Л. Титовскому, а также Руководству МЭС Западной Сибири и Ямало-Ненецкого ПМЭС за организацию содействия в предоставлении системной ВЛ-220 Уренгой-Пангоды в качестве антенны для проведения эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акиндинов В.В., Нарышкин В.И., Рязанцев А.М. Электромагнитные поля в морской воде (обзор) // Радиотехника и электроника. 1976. Т. XXI. Вып. 5. С. 913–944.
- Аглонов С.В. Геодинамика глубоких осадочных бассейнов. СПб.: ЦГИ ТЕТИС. 2000. 211 с.
- Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокочук П.И., Селиванов В.Н., Шевцов А.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. Высоковольтный силовой инвертор генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 2. С. 5–23.
- Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра. 1968. 255 с.
- Бернштейн С.Л., Барроуз М., Эванс Д.Э., Гриффитс Э.С., Макнейл Д.А., Ниссен Ч.У., Ричер А., Уайт Д.П., Уиллим Д.К. Дальняя связь на крайне низких частотах // ТИИЭР. Proceedings IEEE. 1974. Т. 62. С. 5–30.
- Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра. 1965. 108 с.
- Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. Опыт частотно-электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона // Докл. РАН. 1994. Т. 338. № 1. С. 106–109.
- Горбачев В.И., Тарханов Г.В., Есипко О.А., Парасына В.С., Коваленко В.С., Маринин В.И., Конаныхин Г.А. Результаты бурения Ен-Яхинской сверхглубокой скважины. XII Координационное геологическое совещание. М.: ООО “ИРЦ Газпром”. 2007. С. 183–193.
- Дахнов В.Н. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. М.: Гостоптехиздат. 1953.
- Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (справочник геофизика). М.: Недра. 1984. 454 с.
- Есипко О.А., Горбачев, В.И., Соколова Т.Н. Физические свойства пород Тюменской сверхглубокой скважины по данным геофизических исследований // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 6. С. 905–919.
- Жамалетдинов А.А., Ефимов Б.В., Шевцов А.Н. Зондирования с мощными контролируруемыми источниками поля в комплексе с МТЗ (CSMT) – перспективы применения при поисках нефти и газа. Инновационные электромагнитные методы геофизики / Под ред. акад. Е.П. Велихова. М.: изд-во “Научный мир”. 2009. С. 95–112. Инновационные электромагнитные методы геофизики М.: Научный мир. 2009. С. 95–113.
- Жамалетдинов А.А. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируемыми источниками (опыт критического анализа). СПб.: “СОЛО”. 2012. 163 с. ISBN 978-5-98340-272-0 (монография).
- Ингерев О.И. Современные тенденции в развитии аппаратного комплекса для электроразведочных работ на суше и на море. Лекция. Материалы 5-й Всероссийской школы ЭМЗ-2011. Санкт-Петербург, Петродворец. СПб.: изд-во СПбГУ. 2011. Кн. 1. С. 86–103.
- Колобов В.В., Куклин Д.Н., Шевцов А.Н., Жамалетдинов А.А. Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 для электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 2. С. 47–61.
- Мегеря В.М., Филатов В.Г., Старостенко В.И., Корчагин И.Н., Лобанов А.М., Гласко Ю.В., Волоцков М.Ю., Чкачков С.А. Возможности и перспективы применения несейсмических методов для поисков скоплений углеводородов и геосолитонная концепция их образования // Геофизический журнал. Киев: Наукова Думка, 2012. Т. 34. № 3. С. 4–21.
- Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра. 1985. 133 с.
- Семенов В.Ю., Харин Е.П. Электропроводность мантии по данным российских геомагнитных обсерваторий // Физика Земли. 1997. № 9. С. 31–37.
- Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокочук П.И., Селиванов В.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. Повышающий преобразователь и система энергопередачи генератора “Энергия-2” для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2008. Т. 44. № 4. С. 43–66.

- Хахаев Б.Н., Горбачев В.И., Бочкарев В.С. и др.* Основные результаты сверхглубокого бурения в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна, их геодинамическая эволюция и проблемы нефтегазоносности. Тюмень, Новосибирск. 2008. С. 224–227.
- Шевцов А.Н.* Прямая и обратная задачи частотного электромагнитного зондирования с промышленными линиями электропередачи. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Апатиты: изд-во КНЦ РАН. 2006. С. 171–181.
- Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G.* Occam's inversion; a practical algorithm for the inversion of electromagnetic data // *Geophysics*. 1987. V. 52. P. 289–300.
- Копытенко Е.А., Палшин Н.А., Поляков С.В., Шенников А.В., Резников В.И., Самсонов В.В.* New portable multifunctional broadband MT System. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract, Giza, Egypt. September 18–24, 2010.
- Kuvshinov A., Utada H., Avdeev D., Koyama T.* 3D modeling and analysis of the Dst EM Responses in the North Pacific Ocean region // *Geophys. J. Int.* 2005. № 160. P. 505–526.
- Parker R.L.* The inverse problem of electromagnetic induction: existence and construction of solutions based on incomplete data // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 4421–4428.
- Semenov V.Yu., Ádám A., Jówziak W., Ladanyvskyy B., Logvinov I.M., Pek J., Pushkarev P., Vozar J.* and Experimental Team of CEMES (2008). Electrical structure of the upper mantle beneath Central Europe: Results of the CEMES project // *Acta Geophysica*. V. 56. № 4. P. 957–981.
- Vozar J., Semenov V.Y.* Compatibility of induction methods for mantle soundings // *Journal of geophysical researches*. 2010. V. 15. B03101, doi:10.1029/2009JB006390.