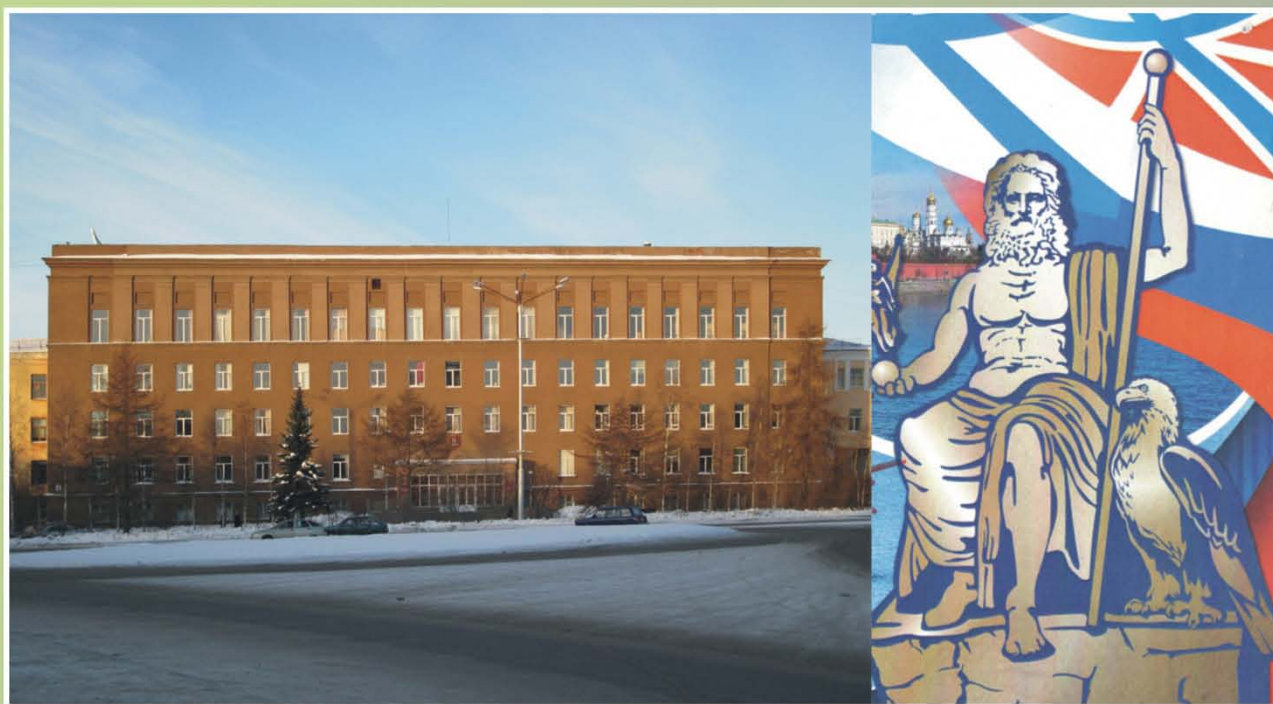




РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КНЧ-СНЧ ДИАПАЗОНА С ИОНОСФЕРОЙ И ЗЕМНОЙ КОРОЙ



Материалы I Всероссийского (с международным участием)
научно-практического семинара, том 2



Российская академия наук
Отделение наук о Земле
Кольский научный центр
Геологический институт

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КНЧ-СНЧ ДИАПАЗОНА С ИОНОСФЕРОЙ И ЗЕМНОЙ КОРОЙ

Гл. редактор акад. РАН Е.П. Велихов
Зам. гл. редактора. д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский
Председатель ред. коллегии д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинов

Материалы I Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара

Апатиты
2015

УДК 550.837 (834)

УДК 623:94 (47)

Взаимодействие электромагнитных полей КНЧ-СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой.

Материалы I Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара. Т. 2 // Рос. акад. наук, Отд. наук о Земле, Кольский научный центр, Геологический институт, гл. ред. акад. РАН Е.П. Велихов, зам. гл. ред. д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский, председатель ред. коллегии д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинов – Апатиты, 2015. – 112 с.

ISBN 978-5-902643-32-6

В книге приведены расчетно-теоретические и экспериментальные работы, посвященные опыту геоэлектромагнитных исследований в крайне- и сверхнизкочастотном (КНЧ-СНЧ) диапазоне 0.1-1000 Гц. Статьи подготовлены на основе докладов, представленных на I Всероссийском (с международным участием) научно-практическом семинаре, состоявшемся на базе Геологического института КНЦ РАН 17 – 22 февраля 2014 года в г. Апатиты.

Книга состоит из трех разделов. В первом разделе приведены результаты расчетно-теоретических работ по распространению КНЧ-СНЧ электромагнитных волн в земле и в волноводе «Земля-ионосфера». Во втором разделе приведены материалы экспериментальных исследований взаимодействия КНЧ-СНЧ электромагнитного поля с земной корой. Здесь же рассмотрена проблема мониторинга лунно-солнечных приливных явлений в естественных и контролируемых полях. В третий раздел помещены статьи, посвященные методике и технике возбуждения и регистрации КНЧ-СНЧ электромагнитного поля.

Книга имеет междисциплинарный характер и представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся глубинными электромагнитными зондированиями с мощными контролируруемыми источниками и дальней радиосвязью в СНЧ диапазоне.

Гл. редактор акад. РАН Е.П. Велихов

Зам. гл. редактора д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский

Председатель ред. коллегии д.г.-м.н. А.А. Жамалетдинов

Редакционная коллегия: М.Б. Баранник, Ю.Б. Башкуев, А.А. Жамалетдинов, В.В. Колобов, В.Е. Корепанов, Т.Г. Короткова (секретарь выпуска), С.В. Поляков, А.Н. Шевцов, Ю.Г. Щорс

Подготовка материала и макетирование: Т.Г. Короткова, Т.А. Мирошниченко (перевод), Н.А. Мансурова, Л.Д. Чистякова

Фото на задней обложке: Дом ученых «Тиетта» (верх). Участники семинара у входа в здание Президиума КНЦ РАН



Всероссийский (с международным участием) научно-практический семинар и издание трудов проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ, грант 13-05-12044-офи-м), Отделения наук о Земле РАН и Геологического института КНЦ РАН.



Russian Academy of Sciences
Department of Earth Sciences
Kola Science Centre
Geological Institute

INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF ULF-ELF WITH THE IONOSPHERE AND EARTH'S CRUST

Editor-in-Chief Academician E.P. Velikhov
Deputy Editor-in-Chief Dr. Sci. Yu.L. Voytekhovskiy
Editorial Board Chairman Dr. Sci. A.A. Zhamaletdinov

Proceedings of the All-Russian (with the International Participation) Research and Practice Workshop

Apatity
2015

UDC 550.837 (834)

UDC 623:94 (47)

Interaction of electromagnetic fields of ULF-ELF with the ionosphere and Earth's crust. Proceedings of the first All-Russian (with the International Participation) Research and Practice Workshop. Volume 2. // Publ. by Russ. Acad. Sci. Depart. Of Earth Sci., Geological Institute Kola Science Center, Editor-in-Chief Academician E.P. Velikhov, Deputy Editor-in-Chief Dr.Sci. Yu.L. Voytekhovsky, Editorial Board Chairman Dr.Sci. A.A. Zhamaletdinov. ÷ Apatity, 2015. V. 2. – 112 pp.

ISBN 978-5-902643-32-6

The book presents calculations, theoretical and experimental works devoted to geoelectromagnetic research in ultra and extremely low frequency (ULF-ELF) range 0.1 - 1000 Hz. These articles are prepared on the basis of reports submitted at the first All-Russian (with international participation) scientific and practical seminar, held on the basis of the Geological Institute KSC 17 - 22 February, 2014 in Apatity.

The book consists of three sections. The first section presents the results of computational and theoretical work on the propagation of ULF-ELF electromagnetic waves in the ground and in a waveguide "Earth-ionosphere." The second section contains materials of experimental studies of the interaction of ULF-ELF electromagnetic field of the Earth's crust. This section also deals with the problem of monitoring the lunar-solar tidal phenomena in the natural and controlled field. The third section contains articles devoted to the methods and techniques of excitation and detection of ULF-ELF electromagnetic field.

The book has an interdisciplinary character and is of interest to a wide range of professionals involved, on the one hand, the question of deep electromagnetic soundings with powerful controlled sources and, on the other hand, the question of distant radio transmission in a extra low (ELF) frequency range.

Editor-in-Chief Academician E.P. Velikhov
Deputy Editor-in-Chief Dr.Sci. Yu.L. Voytekhovsky
Editorial Board Chairman Dr.Sci. A.A. Zhamaletdinov

Editorial Board: M.B. Barannik, Yu.B. Bashkuev, A.A. Zhamaletdinov, V.V. Kolobov., V.E. Korepanov, T.G. Korotkova (Volume Secretary), S.V. Polyakov, A.N. Shevtsov, Yu.G. Shchors

Prepress and Design: T.G. Korotkova, T.A. Miroshnichenko (translation of preface), N.A. Mansurova, L.D. Chistyakova

Photo on the back cover: Scientist House «Tietta» (top). Participants of the workshop by the entrance to the Presidium of the Kola Science Centre RAS.



All-Russian (with the International Participation) Research and Practice Workshop and publication of materials is sponsored by Russian Fund of Basic Research (RFBR, Grant 13-05-12044 ofi-m), Department of Earth Sciences RAS and Geological Institute KSC RAS

© Geological Institute KSC RAS, 2015
© Authors, 2015

Содержание

Предисловие. А.А. Жамалетдинов.....	6
Глава 1. Расчетно-теоретические исследования.....	7
А.Н. Шевцов. Изучение коэффициента ослабления электромагнитных волн КНЧ-СНЧ диапазона в сферической модели волновода Земля-ионосфера.....	7
С.В. Поляков. О пределах применимости теории распространения низкочастотных электромагнитных полей в полости земля-ионосфера на основе двумерного телеграфного уравнения.....	11
А.Н. Шевцов. Влияние возмущенного состояния ионосферы на результаты частотного зондирования с СНЧ антенной «Зевс» в Западной Сибири.....	15
А.А. Жамалетдинов, А.Н. Шевцов. О понятии волновой зоны при глубинных зондированиях в КНЧ-СНЧ диапазоне.....	25
Глава 2. Экспериментальные исследования	32
В.Е. Корепанов. Наблюдения гармонического излучения линий электропередач (PLHR) в ионосфере	31
Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия СНЧ-радиоволн с земной корой на востоке России	36
М.С. Петрищев. Опыт совместной интерпретации СНЧ сигналов источника «Зевс» и АМТ-МТЗ для изучения строения земной коры.....	43
Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов. Глубинные радиоимпедансные зондирования земной коры с использованием электромагнитного поля СНЧ радиоустановки.....	46
Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов, А.В. Ханхараев. Анализ условий распространения СНЧ радиоволн на трассе «Зевс-Забалькалье».....	55
А.А. Жамалетдинов. Электропроводность земной коры в районе СНЧ-антенны «Зевс» по результатам зондирований на постоянном и переменном токе (Мурманский блок).....	63
А.А. Жамалетдинов, Т.Г. Короткова. Мониторинг влияния лунно-солнечных приливных напряжений на электропроводность земной коры на территории Фенноскандинавского щита в поле СНЧ-антенны «Зевс» и в естественных полях (обзор).....	72
Глава 3. Методика и техника возбуждения и регистрации КНЧ-СНЧ электромагнитного поля.....	85
С.В.Поляков, Б.И.Резников, А.В. Щенников. Основные методы и особенности проектирования и тестирования современных индукционных датчиков магнитного поля	85
С.В. Поляков, Б.И. Резников, Ю.В. Шлюгаев, А.В. Щенников, Е.А. Копытенко, Б.В. Самсонов. Индукционные датчики для наземных геофизических исследований IMS 007, IMS 008 и IMS 009. Технические параметры и примеры использования.....	93
В.В. Колобов, Д.В. Куклин, М.Б. Баранник, А.Н. Шевцов. Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 в составе комплекса «Энергия-Зонд» для электромагнитных исследований с использованием антенной системы СпецЛЭП «Зевс»	101
М.Б. Баранник, В.В. Колобов, А.А. Жамалетдинов. КНЧ-генераторы «Энергия-2» и «Энергия-3» в составе генераторно-измерительного комплекса «Энергия-Зонд» для КНЧ-СНЧ электромагнитных исследований с использованием антенной системы СпецЛЭП «Зевс».....	105

Предисловие

Эта книга является второй публикацией по итогам I Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара, состоявшегося в Апатитах 17-22 февраля 2014 г. В первой книге (2014 г.) собраны репринты научных статей, тезисов докладов и сообщений в печати, опубликованных с 1990 по 2013 гг. и посвященных, главным образом, опыту научно-исследовательских и прикладных работ с источником «Зевс» по двойному назначению. Двойное назначение подразумевает использование СНЧ-антенны «Зевс» не только для дальней низкочастотной радиосвязи с погруженными объектами в интересах ВМФ, но и для решения народно-хозяйственных задач, направленных на изучение земной коры и поиски полезных ископаемых.

Вторая книга содержит оригинальные статьи по материалам докладов, заслушанных на Всероссийском семинаре. Она охватывает более широкий круг вопросов. В ней рассмотрены теория и практика КНЧ-СНЧ геоэлектромагнитных исследований с применением контролируемых и естественных источников. В первом разделе представлены расчетно-теоретические работы по распространению КНЧ-СНЧ электромагнитных полей в Земле и околоземном пространстве с учетом строения стенок волновода и возмущенного состояния ионосферы. Рассмотрено понятие о волновой зоне с учетом влияния токов смещения.

Вторая часть, наибольшая по объему, посвящена результатам экспериментальных исследований. В ней приведены результаты изучения особенностей распространения поля СНЧ-источника «Зевс» в Забайкалье и в Западной Сибири для задач дальней связи и изучения земной коры. Здесь же даны результаты наблюдений гармонического излучения линий электропередач в ионосфере, обзор результатов мониторинга лунно-солнечных приливных явлений в полях естественных и контролируемых источников, обобщение исследований по изучению глубинного строения земной коры в районе источника «Зевс» на постоянном и переменном токе.

Третий раздел содержит статьи с описаниями измерительной и генераторной техники, применяемой для возбуждения и регистрации КНЧ-СНЧ электромагнитного поля. Основное внимание уделено особенностям проектирования и тестирования современной измерительной техники на основе высокочувствительных индукционных магнитных преобразователей. Приведено описание проектно-конструкторских разработок, примененных при создании КНЧ-СНЧ генераторов «Энергия-2» и «Энергия-3» мощностью до 200 кВт в составе генераторно-измерительного комплекса «Энергия-Зонд», предназначенного для электромагнитных зондирований земной коры с использованием антенной системы «Зевс».

Глава 1. Расчетно-теоретические исследования

Изучение коэффициента ослабления электромагнитных волн КНЧ-СНЧ диапазона в сферической модели волновода Земля-ионосфера

А.Н. Шевцов.

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

Введение.

Как известно взаимодействие электромагнитного поля со средой описывается материальными соотношениями, которые, для слабых полей в случае однородной и изотропной среды, аппроксимируются линейными уравнениями с коэффициентами, характеризующими свойства среды. Основными характеристиками являются удельная электропроводность σ , которая в СИ имеет размерность (См/м), и безразмерные величины ε_r и μ_r – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости. Эти величины в представлении сплошной среды являются макроскопическими характеристиками, которые связаны с квантовыми характеристиками атомных систем, ионов и свободных электронов. Взаимодействие поля электромагнитной волны с зарядами в среде приводит к уменьшению интенсивности излучения по мере распространения волны в среде – экспоненциальный закон поглощения Бугера-Ламберта-Бера: $I = I_0 e^{-\beta \cdot r}$, где I_0 – интенсивность излучения в начальной точке, β – коэффициент поглощения (затухания) и I интенсивность излучения после прохождения им расстояния r в среде. Коэффициент поглощения β является количественной характеристикой процесса поглощения электромагнитного излучения в однородной среде, величина которой зависит от частоты поля и макроскопических характеристик среды – σ , ε_r , μ_r . Поскольку квадрат амплитуды электрического поля определяет интенсивность излучения, ослабление напряженности поля с расстоянием можно характеризовать коэффициентом ослабления $\alpha = \frac{1}{2}\beta$. В случае неоднородных сред или при наличии границ раздела можно ввести эффективную характеристику распространения электромагнитного поля – эффективный коэффициент ослабления, который позволяет оценивать амплитуды поля на различных расстояниях от источника в зависимости от свойств среды и частоты излучения.

Монохроматическая плоская волна и ее параметры в однородной среде.

Рассмотрим распространение монохроматического электромагнитного поля, величины которого зависят от времени пропорционально комплексной экспоненте $\exp(-i\omega t)$, в виде плоской волны. Вне источников, при линейных материальных соотношениях в однородной проводящей среде электрическое и магнитное поле определяются уравнением Гельмгольца. Так для электрического поля:

$$\Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (1)$$

Решение этого уравнения в общем случае для волны, распространяющейся вдоль волнового вектора $\vec{k} = \vec{k}_0 k$, в точке определяемой радиус-вектором $\vec{r}$, можно записать как

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}) \exp(-i(\omega t - \vec{k} \vec{r})) = \vec{E}_0(\vec{r}) \exp(-\alpha \frac{\omega}{c} \vec{k}_0 \vec{r}) \exp(-i\omega(t - n \frac{\vec{k}_0 \vec{r}}{c})) \quad (2)$$

Величина

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \exp(-\alpha \frac{\omega}{c} \vec{k}_0 \vec{r}) \quad (3)$$

называется амплитудой поля и от времени не зависит. Здесь $\vec{k}_0$ – единичный вектор направления распространения, а комплексное волновое число [8] $k = \sqrt{\omega^2 \mu \varepsilon + i \omega \mu \sigma}$

Здесь μ , и ε абсолютные значения магнитной и диэлектрической проницаемости, которые можно записать в СИ как $\mu = \mu_r \mu_0$, и $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$. Размерные электродинамические постоянные $\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ (Ф/м) и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м), где фундаментальная постоянная $c = 299792458$ м/с – скорость света в вакууме, ω – циклическая частота колебаний во времени, μ_r и ε_r – безразмерные относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости среды, σ – удельная электропроводность (См/м).

Перепишем волновое число в виде

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r \left(1 + \frac{i\sigma}{\omega \varepsilon}\right)}. \quad (4)$$

Запишем это выражение, как

$$k = \frac{\omega}{c} (n - i\alpha). \quad (5)$$

Величина $n = c/V_{ph}$ – показатель преломления, определяется отношением скорости света c в вакууме к фазовой скорости волны в среде V_{ph} , а коэффициент ослабления α в первой экспоненте определяет уменьшение амплитуды поля по мере распространения в среде. Чтобы связать безразмерные параметры распространения волны n и α со свойствами среды, возведем в квадрат левые и правые части (4) и (5) и приравняем вещественные и мнимые части полученных выражений. Тогда показатель преломления

$$n = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{(\mu_r \varepsilon_r)^2 + \left(\mu_r \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} + (\mu_r \varepsilon_r)^2 \right)} \quad (6)$$

и коэффициент ослабления

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{(\mu_r \varepsilon_r)^2 + \left(\mu_r \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2} - (\mu_r \varepsilon_r)^2 \right)}, \quad (7)$$

Причем здесь $\alpha \geq 0$. Равенство $\alpha = 0$ возможно лишь при полном отсутствии токов проводимости (среда без потерь – идеальный диэлектрик).

Таким образом, вещественная часть k определяет фазовое запаздывание волны, а мнимая – экспоненциальное затухание амплитуды. При этом оба явления зависят от абсолютной величины отношения плотностей тока проводимости и тока смещения

$$\left| \frac{j\sigma}{j\varepsilon} \right| = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}. \quad (8)$$

В пределе малых токов проводимости (малая электропроводность или высокая частота) $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \ll 1$,

$$k \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \left(1 - \frac{i\sigma}{2\omega \varepsilon} \right). \quad (9)$$

В этом случае

$$n \approx \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}, \text{ а } \alpha \approx \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \frac{\sigma}{2\omega \varepsilon_0}. \quad (10)$$

Причем $n \gg \alpha$.

Если малы токи смещения (большая электропроводность, низкая частота), $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \gg 1$, можно записать

$$k \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \left(\frac{i\sigma}{\omega \varepsilon} \right), \quad (12)$$

и

$$n \approx \alpha \approx \sqrt{\frac{\mu_r \sigma}{2\omega \varepsilon_0}}. \quad (13)$$

Если получены два значения какой-либо компоненты электрического поля E_j , $j=1,2$ в двух разных точках на удалениях r_j (км) от источника вдоль направления распространения волны (вдоль единичного вектора $\vec{k}_0$), то коэффициент ослабления в дБ/1000 км можно определить по формуле

$$\alpha = -20 \lg \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \frac{1000}{r_2 - r_1} \quad (14)$$

Поле в сферическом волноводе.

Допустим низкочастотное поле КНЧ-СНЧ диапазона распространяется в регулярном изотропном сферическом волноводе “Земля-ионосфера”, то есть Земля – однородный и изотропный проводящий шар, а ионосфера – однородная изотропная среда с резкой границей, окружающая непроводящую атмосферу – сферический слой – диэлектрик. В этом случае поле можно приближенно представить в виде вертикально-поляризованной поперечной электрической моды (ТЕ-моды) [4, 1]. Для горизонтального электрического диполя, с гармонически зависящей от времени силой тока, амплитуда вертикальной электрической компоненты E_z в дальней зоне источника ($r > 500$ км) для частот ниже 10 кГц вдоль профиля наблюдений ориентированного вдоль оси питающего диполя записывается как [4, 1].

$$E_z \approx \frac{iZ_{tr}}{2h_i} \cdot \sqrt{\frac{k_0 \Gamma_0}{2\pi r}} \cdot Idl_{AB} \sqrt{\frac{r/a}{\sin(r/a)}} \exp \left(-ik_0 \Gamma_0 r - i\frac{\pi}{4} \right) \cos \varphi. \quad (15)$$

Здесь $Z_{tr} = \sqrt{i\omega\mu_0\rho_{tr}}$ - собственный импеданс земли под передающей антенной; $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ - волновое число свободного пространства, где $\omega = 2\pi f$ - циклическая частота, f - частота колебаний тока в источнике в Гц, ρ_{tr} - электрические сопротивления Земли под источником и приемником, соответственно, h_i - высота нижней границы ионосферы в км, $I \cdot l_{AB}$ - электрический момент питающего диполя в А · км, $a = 6370$ км – радиус Земли; φ - азимутальный угол между осью питающего диполя и направлением распространения электромагнитной волны, r - дистанция вдоль поверхности Земли по кратчайшей дуге большого круга от излучателя до приемника в км. Если эффективный коэффициент ослабления α_0 выражается в Дб/1000 км, то величина

$$\Gamma_0 = c/V_{ph} - i5.49\alpha_0/f, \quad (16)$$

где $V_{ph} = c/n$ - фазовая скорость волны в волноводе.

В работе [7] вертикальная электрическая компонента поля E_z в сферическом волноводе “Земля-ионосфера” в воздухе для профиля ориентированного вдоль оси заземленного электрического питающего диполя представлена через функцию Ханкеля в виде

$$E_z = -i \frac{Z_e}{4h_i} \cdot k I l_{AB} \sqrt{\frac{r/a}{\sin(r/a)}} H_1^{(2)}(ikr) \cos \varphi \quad (17)$$

Переменные в уравнении (17) те же, что и в уравнении (15), за исключением: $k = k_0 S$ волновое число в волноводе, $Z_e = \sqrt{i\omega\mu_0/(\sigma_e + i\omega\varepsilon_e)}$, $Z_i = \sqrt{i\omega\mu_0/(\sigma_i + i\omega\varepsilon_i)}$ - собственные импедансы Земли и ионосферы, соответственно. Абсолютные диэлектрические проницаемости ионосферы и земли - ε_i , и ε_e , соответственно. Их удельные проводимости - σ_i и σ_e . Величина $S = \sqrt{1 - i \frac{Z_e + Z_i}{\omega\mu_0 h_i}} = \Gamma_0$ - это синус комплексного угла падения волны, который включает функции отклика Земли и ионосферы - Z_e, Z_i . $H_1^{(2)}$ - функция Ханкеля комплексного аргумента ikr . Отсюда можно выразить эффективный коэффициент ослабления:

$$\alpha_0 = -\frac{2\pi}{5.49\omega} \text{Im}(S) \quad (18)$$

Пока выполняются условия $r \gg h_i$, $|Sk(r-\pi a)| \gg 1$ можно применять выражение (17). Если $kr \gg 1$, и r/a не равно нулю или π , тогда (17) может быть записано с использованием асимптотики функции Ханкеля в виде (15). При условии $h_i \ll a$, $r \ll 2\pi a$ (на практике для $r < 2000$ км) волновод можно приближенно рассматривать как плоский слой диэлектрика (воздух) между двумя проводниками – Земля и ионосфера. Поле в этом приближении E_z^{flat} в наиболее общей постановке можно рассчитать по алгоритму, описанному в работе [5, 3].

На рис. 1 представлены результаты расчетов вертикальной компоненты электрического поля E_z для плоской модели волновода по [3] - кривая E_z^{flat} , для сферической модели кривые E_z^{SB} и E_z^{SC} по уравнениям (15) и (17), соответственно. Видно, что значения поля на кривых E_z^{SB} , E_z^{SC} для сферической и E_z^{flat} для плоской моделей с понижением частоты расходятся тем больше, чем меньше расстояние до источника, поскольку при малых разностях ослабление амплитуды поля в зависимости от расстояния зависит не по экспоненте, а происходит по степенному закону и точнее описывается решением для плоского волновода E_z^{flat} . С понижением частоты нарушается условие $kr \gg 1$, при котором можно использовать асимптотическое представление функции Ханкеля через функцию Бесселя. Поэтому на низкой частоте и вблизи источника кривая E_z^{SB} сильнее отклоняется от кривой E_z^{flat} , чем кривая E_z^{SC} . С другой стороны – с увеличением частоты уменьшается действие токов проводимости и, согласно (10) обратно пропорционально частоте, уменьшается ослабление поля среде. Отсюда амплитуды поля для частоты 320 Гц на тех же разностях (при $r > 2000$ км) больше, чем на частоте 32 Гц почти на порядок.

Результаты расчета коэффициента ослабления для данных параметров земли, атмосферы и ионосферы по формуле (17), по результатам решения прямой задачи для плоской модели и результатам наблюдений в двух разных точках на удалениях r_1 и $r_2 = r_1 + \Delta r$ (км) по формуле (14) представлены на рис. 2. Здесь же заштрихованной областью показаны оценки по измерениям поля СНЧ источника на удалениях свыше 2000 км и по шумановским резонансам.

Из рис. 2 видно, что с увеличением расстояния до источника значения коэффициента ослабления для плоской модели асимптотически приближаются к значениям для сферического волновода, которые согласуются с результатами наблюдений на больших расстояниях.

Таким образом, проведенные исследования показали хорошее согласие рассчитанной вертикальной компоненты электрического поля по уравнению (17) и для приближения плоского волновода в КНЧ-СНЧ диапазоне 3.2 – 320 Гц на удалениях от источника от 200 км до 1000 км. При этом значения коэффициента ослабления для плоского волновода асимптотически приближаются с ростом частоты к значениям для регулярного сферического волновода на удалениях 2000-10000 км от источника.

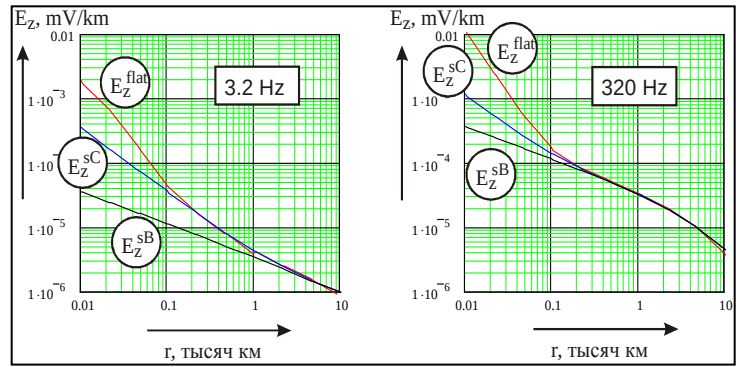


Рис. 1. Вертикальная электрическая компонента для плоской E_z^{flat} и сферической (E_z^{SB} , E_z^{SC}) моделей. Момент источника $Idl_{AB} = 10^4$ А·км. Параметры модели – Земля: $\sigma = 10^{-5}$ См/м, $\mu = 1$, $\epsilon = 1$. Воздух: $\sigma = 10^{-14}$ См/м, $\mu = 1$, $\epsilon = 1$. Ионосфера: $\sigma = 10^4$ См/м, $\mu = 1$, $\epsilon = 1$. Высота до нижней границы ионосферы от поверхности Земли $h_i = 100$ км.

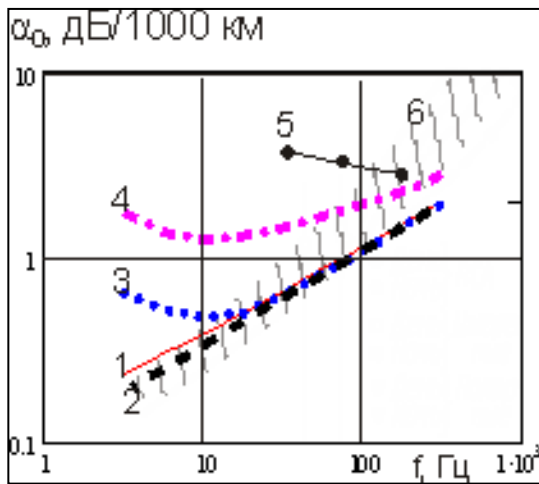


Рис. 2. Коэффициент ослабления для вертикальной компоненты электрического поля. Шифр кривых: 1 – для сферического волновода по формуле (17), 2, 3, 4 – для плоского волновода на трех расстояниях r_1 10000 км, 5000 км и 2000 км, соответственно, для $\Delta r/r_1 = 0.01$. 5 – по результатам измерений с СНЧ антенной на удалениях 100-800 км [2], 6 – по результатам измерений поля СНЧ источника на удалениях свыше 2000 км и шумановским резонансам [4, 1].

Список литературы

1. Акиндинов В.В., Нарышкин В.И., Рязанцев А.М. Электромагнитные поля в морской воде (обзор). // Журнал «Радиотехника и электроника», 1976. Т. XXI. Вып. 5. С. 913- 944.
2. Жамалетдинов А.А., А.Н. Шевцов, А.Д. Токарев, Ю. М. Кононов, Л. Л. Ваньян. Влияние ионосферы и токов смещения на результаты глубинного электромагнитного зондирования в поле СНЧ антенны.// ДАН, т. 366, No. 5, 1999. P. 688-691.
3. Шевцов А.Н. (2001).Метод частотного зондирования в изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита. // диссертация канд. физ.-мат. наук.СПб СПбГУ. 99 с.
4. Bernstein, S.L., Burrows, M., Evans, J.E., et al. (1974), Long_Range Communication at Extremely Low Frequencies, Proc. IEEE, 1974, vol. 62, no. 3, pp. 292–312.
5. Boerner D.E. and West G.F. (1989). A generalized representation of electromagnetic fields in a layered Earth // Geophysical Journal of the RAS, DGG and EGS. 1989. V. 97, N3, P. 529-547.
6. Burrow Michael L.. ELF Communication Antennas.//Peter Peregrinus LTD, 44 -69, 1978
7. Chao L., Long-gen Z., Yong-Pin L. (2009). A Closed-Form Solution for ELF Radiated Fields of Line Current Antenna in Earth-Ionosphere Waveguide. // IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09. 5-th International Conference on 24-26 Sept. 2009. Beijing. p.1-4, ISBN- 978-1-4244-3692-7, DOI 10.1109/WICOM.2009.5301548).
8. Løseth Lars O., Hans M. Pedersen, Bjørn Ursin, Lasse Amundsen, and Svein Ellingsrud (2006) Low-frequency electromagnetic fields in applied geophysics: Waves or diffusion? //GEOPHYSICS, VOL. 71, NO. 4, JULY-AUGUST 2006; P. 29–40; 10.1190/1.2208275

О пределах применимости теории распространения низкочастотных электромагнитных полей в полости земля-ионосфера на основе двумерного телеграфного уравнения

С.В. Поляков

ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород, svp@nirfi.sci-nnov.ru

Введение

Вопрос о влиянии сильных горизонтальных неоднородностей ионосферы (в первую очередь, терминатора) на регулярный грозовой шумовой фон в диапазоне крайне низких частот (КНЧ) до сих пор остается открытым. К настоящему времени известны две попытки построения общей теории распространения КНЧ волн вблизи Земли, учитывающей все основные качественные особенности среды (гиротропия, вертикальные и горизонтальные неоднородности ионосферы, сферическая геометрия).

Во-первых, отметим большой и последовательный цикл работ по теории шумановских резонансов, выполненный в Украине (см. [2, 11] и цитируемую литературу). Здесь решение в полости земля-ионосфера строится в виде разложения по собственным функциям полости земля-ионосфера с идеально отражающими границами. При этом полагается, что поправки, связанные с учетом реальных параметров ионосферы, малы. В качестве малого параметра используется импеданс ионосферы. Для электрической поляризации импеданс ионосферы действительно очень мал (по отношению к импедансу полупространства земля – полость земля-ионосфера), чего нельзя сказать о магнитной поляризации. То есть, в общем случае гиротропной ионосферы метод возмущений должным образом не обоснован, а полученные решения, по нашему мнению, представляют только методический интерес. Сказанное подтверждается опытным фактом существования резонансной структуры спектра естественного шумового фона, связанной с ионосферным альвеновским резонатором (ИАР) [1], в которой магнитные поля электрической и магнитной поляризации соизмеримы между собой.

Далее, в работах [3-8] было предложено развивать теорию распространения КНЧ и СНЧ волн в полости земля-ионосфера на основе двумерного телеграфного уравнения (ДТУ). При этом в качестве динамических переменных выступают не поля, а напряжение между землей и ионосферой, токи в земле и ионосфере и поверхностные заряды. Подобный подход на низких частотах представляется естественным, и на его основе был решен целый ряд частных модельных задач, учитывающих сферичность земли, гиротропию и горизонтальную неоднородность день-ночь ионосферы. Подчеркнем, что решение, одновременно учитывающее все названные свойства среды, до сих пор не получено. На основе решений частных задач были сделаны смелые обобщения и заявлено решение обсуждаемой задачи в общем случае.

Необходимо сказать, что предложенный подход на основе ДТУ является реальным шагом вперед в теории распространения низкочастотных волн. Он позволяет последовательно и корректно рассматривать сильные ионосферные неоднородности. На его основе естественным образом учитывается влияние ионосферного альвеновского резонатора (ИАР).

Спорное звено обсуждаемых теоретических построений по учету горизонтальной ионосферной неоднородности день-ночь (терминатор) в общем случае состоит в некорректном, по нашему мнению, граничном условии для ионосферного тока на терминаторе. Эта задача строго решена только для модели изотропной ионосферы, где полагается, что нормальная (к терминатору) горизонтальная компонента ионосферного тока непрерывна на терминаторе. При одновременном учете анизотропии и горизонтальной неоднородности ионосферы необходимо учитывать возможность затекания части тока в верхнюю ионосферу (магнитосферу) или, другими словами, возможность излучения альвеновских волн, что и является целью настоящей работы.

Очевидно, что говорить о затекании тока в верхнюю ионосферу можно только в случае, когда нижняя ионосфера оптически тонка. На сверхнизких частотах (СНЧ, $f = 30-300$ Гц) оптическая толщина нижней ионосферы больше единицы, как для дневной, так и для ночной ионосферы. Поэтому для СНЧ диапазона разработанная к настоящему времени теория ДТУ является адекватной. На крайне низких частотах (КНЧ, $3 \text{ Гц} < f < 30 \text{ Гц}$), по крайней мере, в части терминатора с ночной стороны нижняя ионосфера оптически тонка, и возможно затекание тока в верхнюю ионосферу.

В качестве основы использовано граничное условие для альвеновских волн на горизонтально неоднородной ионосфере, которое широко используется в геофизике [9]. Для модели терминатора в виде плавного перехода параметров ионосферы между днем и ночью получено искомое граничное условие для нормальной компоненты тока с учетом излучения альвеновских волн.

Исходные уравнения. Постановка задачи

Одним из важных результатов исследований в области магнитосферно-ионосферного взаимодействия является установление граничного условия для альвеновской волны магнитосферного происхождения на горизонтально неоднородной ионосфере [9]. Традиционная постановка обсуждаемой задачи, представленная в

геофизической литературе, состоит в следующем. Рассмотрим плоско-слоистую модель среды с осью z , направленной вертикально вверх. Земное магнитное поле также полагаем направленным по вертикали. Проводящую нижнюю ионосферу считаем оптически тонкой и описываем тензором поверхностной проводимости $\hat{\Sigma}$, причем $\hat{\Sigma}$ может зависеть от горизонтальных координат. Пренебрегая током смещения, запишем уравнение непрерывности на уровне выше максимумов ионосферных проводимостей h^* , где их величина существенно спадает

$$\text{div} \vec{J} + j_z|_{z=h^*} = 0 \quad (1)$$

Здесь j_z – плотность продольного тока, вытекающего из ионосферы, $\vec{J}$ – поверхностная плотность горизонтального ионосферного тока. В соответствии с законом Ома

$$\vec{J} = \hat{\Sigma} \vec{E} \quad (2)$$

Полагая $E_z = 0$, из уравнений Максвелла несложно получить хорошо известное соотношение между продольным током j_z и электрическим полем $\vec{E}$

$$\frac{\partial j_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial z} \text{div} \vec{E} \quad (3)$$

Дифференцирование (1) по времени и подстановка в него (2) и (3) позволяют получить известную запись обсуждаемого граничного условия

$$\text{div} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\hat{\Sigma} \vec{E}) - \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \vec{E}}{\partial z} \right]_{z=h^*} = 0 \quad (4)$$

Соотношение (4) представляет собой другую форму записи уравнения непрерывности и в общем виде для решения задачи отражения альвеновской волны от горизонтально неоднородной ионосферы практически бесполезно. В работе [9] показано, что для достаточно низких частот электрическое поле в формуле (4) можно отождествить с электрическим полем альвеновских волн (падающей и отраженной). Другими словами, электрическим полем трансформированной магнитозвуковой волны можно пренебречь. В этом случае электрическое поле в горизонтальной плоскости потенциально, что позволяет с успехом решать задачи магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Перейдем к заявленной задаче. Модель среды по оси z остается прежней, но мы будем полагать, что источники расположены в полости земля-ионосфера. Это позволяет по оси z перейти к внутренней задаче. Очевидно, что на уровне $z = h^*$ для альвеновской волны выполняются импедансные граничные условия:

$$\vec{E}_A = Z [\vec{H}_A \vec{z}^0] \quad (5)$$

Здесь Z – импеданс полупространства $z > h^*$, $\vec{E}_A$ и $\vec{H}_A$ – спектральные компоненты полей альвеновской волны. Зависимость от времени вида $e^{-i\omega t}$. Используя (5) и закон Фарадея, несложно получить

$$\frac{\partial \vec{E}_A}{\partial z} = \frac{i\omega \mu_0}{Z} \vec{E}_A \quad (6)$$

Далее, используя (6), запишем продольный ток (3)

$$j_z = Y \text{div} \vec{E} \quad (7)$$

где $Y = Z^{-1}$ – адмитанс полупространства верхняя ионосфера – магнитосфера. Мы полагаем адмитанс Y горизонтально однородным (см. ниже). В формуле (7) фигурирует полное поле, включая электрическое поле магнитозвуковой волны. Это оправдано, поскольку для магнитозвуковой волн формула (7) обнуляется.

Наконец, используя (2) и (7), запишем уравнение непрерывности (1) для внутренней задачи с источниками, расположенными в полости земля-ионосфера и для гармонических процессов

$$\text{div} \left[(\hat{\Sigma} + Y) \vec{E} \right]_{z=h^*} = 0 \quad (8)$$

Несколько слов о пределе применимости (8). В отличие от задач магнитосферно-ионосферного взаимодействия, в (8) мы учитываем поля как альвеновской, так и магнитозвуковой поляризации. По этой причине пределы применимости (8) по частоте определяются пределами применимости модели оптически тонкой нижней ионосферы (частота $f < 20$ Гц для ночной ионосферы, $f < 0,2$ Гц для дневной).

Продольные токи в районе терминатора. Граничное условие для тока на терминаторе

В контексте данной работы под терминатором понимается линия (полоса) в проекции на земную поверхность, поперек которой проходит относительно резкое изменение величины интегральных проводимостей с дневных значений на ночные или наоборот (вечер или утро) за счет движения по высоте границы свет-тьнь. При этом условия освещенности верхней ионосферы над терминатором качественно не меняются. По этой причине в модели полагаем верхнюю ионосферу горизонтально однородной над терминатором. Далее, учтем, что максимум холмовской проводимости расположен ниже максимума педерсеновской проводимости. Это значит, что перестройка холмовской проводимости по отношению к перестройке педерсеновской проводимости по времени будет происходить ранее в вечерние часы и позднее в утренние. А интересующие нас процессы (продольные токи), как будет видно из дальнейшего изложения, имеют место быть вблизи ночной ионосферы. Исходя из сказанного, предлагается следующая модель пространственного распределения интегральных проводимостей в ночной стороне терминатора

$$\begin{aligned} \Sigma_p(x) &= \Sigma_p g(x); \quad \Sigma_H(x) = \Sigma_H = \text{const}(x) \\ g(x) &= \begin{cases} 1, & x < 0 \\ 1 + x/l, & x > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь Σ_p и Σ_H - ночные значения интегральных проводимостей, $x=0$ – условная граница терминатора с ночной стороны, l – характерная величина пространственного изменения интегральной проводимости. Величина l порядка нескольких километров, поскольку интегральные проводимости меняются почти на два порядка на горизонтальном масштабе (200-300 км).

Перепишем (8) в явном виде. При этом полагаем, что $Y = \text{const}(x)$, а компонента поля E_y (вдоль терминатора) непрерывна на терминаторе:

$$[\Sigma_p(x) + Y] \frac{dE_x}{dx} + E_x \frac{d\Sigma_p(x)}{dx} = 0 \quad (10)$$

Решение уравнения (10) с учетом (9) запишется

$$E_x = \frac{C}{x + l'} \quad (11)$$

Здесь $l' = l(1 + Y/Y_p)$.

Из (11) и (7) следует формула для плотности продольного тока:

$$j_z|_{x < 0} = -\frac{CY}{(x + l')^2} \quad (12)$$

Оценим толщину токового слоя продольных токов $l' = l(1 + Y/Y_p)$. Пусть $l = 5$ км. Положим для ночной ионосферы $Y_p = 0,3$ Ом⁻¹. Адмитанс верхней ионосферы при наличии отраженных волн от внешней части главного ионосферного максимума (ИАР) будет иметь осциллирующий характер. Для оценки положим, что отраженных волн нет, тогда $Y = n/Z_0$, где $Z_0 = 120\pi$ Ом – импеданс вакуума, n – показатель преломления альвеновской волны в верхней ионосфере, $n \approx 500$. В итоге получаем $l' \approx 27$ км, то есть слой с продольным током очень тонкий по сравнению с горизонтальным масштабом терминатора. При этом $Y/Y_p = 4,4$. Интегрируя (12) по координате x запишем поверхностную плотность продольного тока:

$$J_z = \int_0^\infty j_z dx = -\frac{CY}{l'} \quad (13)$$

Введем обозначения: J_{np} - педерсеновский поверхностный ток в ночной ионосфере, текущий по нормали к терминатору по оси x . J_{dp} - педерсеновский поверхностный ток в области терминатора правее токового листа J_z и также текущий по оси x . J_H - ионосферный холмовский поверхностный ток, который в рамках рассматриваемой модели является константой. Наконец J_n и J_d - полные ионосферные поверхностные токи, определенные аналогично J_{np} и J_{nd} . Используя (9) и (11), запишем J_d :

$$J_d = J_x|_{x \rightarrow \infty} = \Sigma_p(x)E_x(x) + \Sigma_H E_y|_{x \rightarrow \infty} = \frac{C\Sigma_p}{l} + \Sigma_H E_y = J_{dp} + J_H \quad (14)$$

В соответствии с первым правилом Кирхгофа:

$$J_n = J_d + J_z; \quad J_{np} = J_{dp} + J_z \quad (15)$$

Взяв за основу ночной ток J_{np} и используя (13), (14), (15), определяем константу C и поверхностный продольный ток:

$$C = \frac{J_{np} l'}{\Sigma_p}; \quad J_z = -J_{np} \frac{Y}{\Sigma_p} \quad (16)$$

Наконец запишем искомое граничное условие для нормальной компоненты ионосферного тока на терминаторе

$$J_d - J_n = J_{np} \frac{Y}{\Sigma_p} \text{ или } J_{dp} - J_{np} \left(1 + \frac{Y}{\Sigma_p} \right) = 0 \quad (17)$$

Типичная величина отношения $Y/U_p \approx 4-5$, то есть полученные граничные условия (17) радикально отличаются от случая изотропной ионосферы [3-8], где полагалось $J_d = J_n$.

Вернемся к вопросу о пределах применимости граничного условия для тока на терминаторе (17) по частоте. Из процедуры вывода граничного условия (17) следует, что вывод является корректным, если оптическая толщина нижней ионосферы меньше единицы в той области терминатора, где расположена основная часть продольного тока. Очевидно, что предел применимости на частоте $\bar{f}$ лежит в диапазоне частот

$$0,2 \text{ Гц} = \bar{f}_{\text{день}} < \bar{f} < \bar{f}_{\text{ночь}} = 20 \text{ Гц} \quad (18)$$

Выше было показано, что толщина слоя с продольным током l' мала по сравнению с шириной терминатора, и приведена оценка $l' \approx 27 \text{ км}$ для $l = 5 \text{ км}$. Отсюда и из (9) для $g(l')$ получаем оценку $g(l') \approx 6,4$, то есть $\Sigma_p(l')/\Sigma_p = 6,4$. Здесь и ранее Σ_p – интегральная проводимость ночной нижней ионосферы. Оптическая толщина нижней ионосферы ϕ пропорциональна $\sqrt{Nf}$, где N – электронная концентрация в Е-слое ионосферы. Отсюда и из (18) получаем оценку $\bar{f} = 20 \text{ Гц} / 6,4 = 3,1 \text{ Гц}$. То есть, на гипернизких частотах (ГНЧ, $f < 3 \text{ Гц}$, [10]) в качестве граничного условия для нормальной компоненты горизонтального ионосферного тока на терминаторе можно использовать формулу (17). Диапазон КНЧ является переходной областью (по частоте), в которой существует продольный ток, локализованный в ночной части терминатора. На верхней границе диапазона КНЧ продольный ток отсутствует. Таким образом, пределы применимости метода ДТУ по частоте в его классическом варианте с непрерывностью нормального ионосферного тока на терминаторе находятся внутри диапазона КНЧ.

Заключение

В работе на основе широко известного в геофизике граничного условия для альвеновской волны магнитосферного происхождения на ионосфере получено граничное условие для горизонтального ионосферного тока на терминаторе с учетом затекания части тока в верхнюю ионосферу и магнитосферу. При этом полагается, что источники расположены в полости земля-ионосфера. Обсуждаются пределы применимости полученного граничного условия и пределы применимости теории ДТУ по частоте.

Список литературы

1. Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Экспериментальные исследования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 6. С. 663-672.
2. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости земля-ионосфера. – Киев. Наукова думка, 1977. 200с.
3. Кириллов В.В. Двумерная теория распространения электромагнитных волн СНЧ-диапазона в волноводном канале Земля-ионосфера. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 9. С. 1103-1112.
4. Кириллов В.В., Копейкин В.Н., Муштак В.К. Электромагнитные волны СНЧ-диапазона в волноводном канале Земля-ионосфера. // Геомагнетизм и Аэрономия. 1997. Т. 37. №3. С. 114-120.
5. Кириллов В.В. Параметры двумерного телеграфного уравнения в диапазоне СНЧ. // Радиотехника и Электроника. 1998. Т. 43. № 7. С. 779-785.
6. Кириллов В.В. Двумерная теория распространения электромагнитных волн СНЧ- и КНЧ-диапазонов в волноводном канале Земля-ионосфера. // Космическая радиофизика. М.: 1998. Вып. 3. С. 11-26.
7. Кириллов В.В., Копейкин В.Н. Решение двумерного телеграфного уравнения с анизотропными параметрами. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2002. Т. 45. № 12. С. 1011-1025.
8. Кириллов В.В., Копейкин В.Н. Формирование резонансной структуры локальной индуктивности ионосферы в диапазоне 0,1 – 10 Гц. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 1. С. 1-12.
9. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. // М.: Наука, 1983. 192 с.
10. Морская радиоэлектроника: Справочник / И.В. Соловьев, Г.Н. Корольков, А.А. Бараненко и др., под ред. В.А. Кравченко. – СПб.: Политехника, 2003. 246 с.
11. Nickolaenko A.P., Hayakawa M. Resonances in the earth-ionosphere cavity. – Dordrecht/Boston/London, Kluwer Academic Publishers, 2010. 375 с.

Влияние возмущенного состояния ионосферы на результаты частотного зондирования с СНЧ антенной «Зевес» в Западной Сибири

А.Н. Шевцов

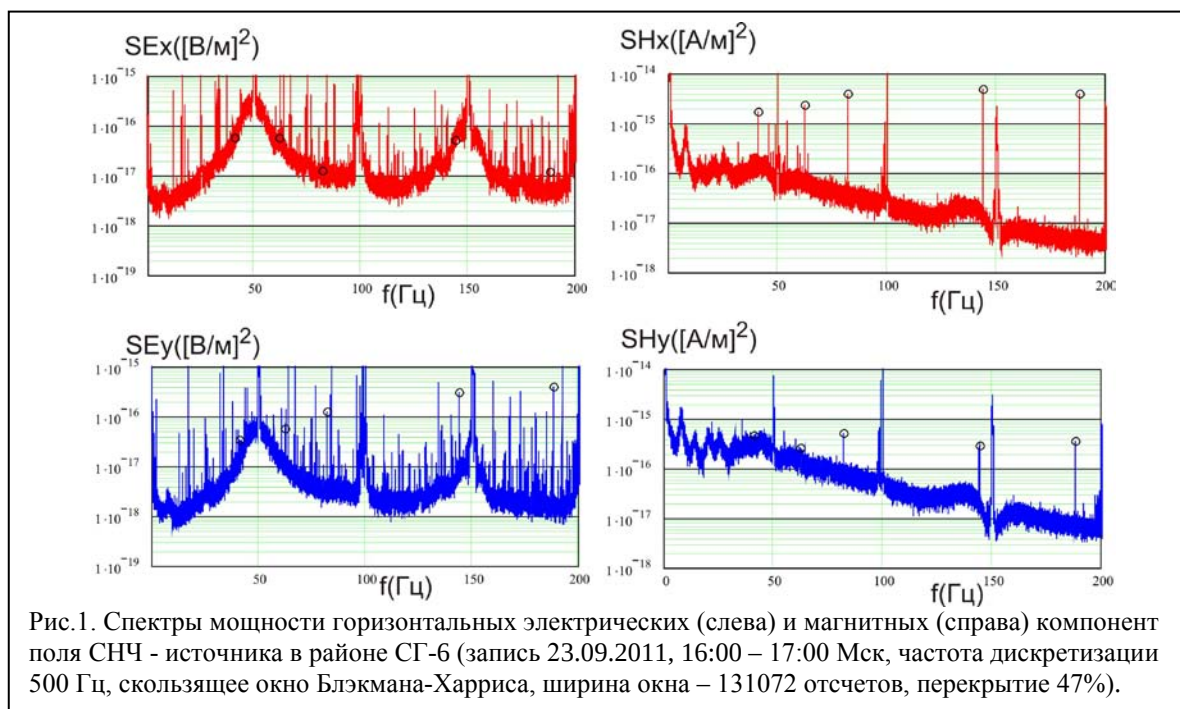
Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия, anshev2009-01@rambler.ru

Введение

Работа посвящена интерпретации результатов измерений электромагнитного поля СНЧ-антенны "Зевес" на территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в 2011-2012 годах в рамках проекта РФФИ [5]. Впервые с проблемой учета параметров ионосферы на результаты частотного зондирования с мощными контролируруемыми источниками мы столкнулись в ходе работ с СНЧ-антенной «Зевес» в экспериментах 1992-97 годов [3]. Расстояние до источника 1745 км, угол относительно оси источника 100° . Измерения проводились в непосредственной близости от двух сверхглубоких скважин СГ-6 (7502 м) и СГ-7 (8250 м). Несмотря на значительное расстояние между ними (160 км) существует почти полное сходство геологических разрезов и электрических параметров разрезов СГ-6 и СГ-7 в соответствии с данными, полученными с установок «потенциального зонда» и "бокового каротажа". Это позволило предположить, что геоэлектрическая часть осадочного чехла в районе исследований близка к 1-D модели. Однако вычисление компонент электромагнитного поля по алгоритму, описанному в работе [8] для плоскостной среды в непосредственной близости от СГ-7, выявил существенное превышение измеренных значений горизонтальных компонент электрического и магнитного поля на частотах 41-188 Гц над значениями, полученными теоретически, по программе расчета поля горизонтального электрического диполя в однородно-слоистых средах. Данное расхождение, возможно, частично объясняется влиянием геоэлектрического разреза под излучателем. Для выявления этого влияния выполнены расчеты компонент электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в сферическом волноводе земля-ионосфера в СНЧ диапазоне и выполнено решение обратной задачи с определением параметров, как Земли, так и ионосферы. Результаты вычислений показали, что модели ионосферы, удовлетворяющие данным наблюдений в районах СГ-6 и СГ-7, существенно отличаются. Дальнейшее изучение выявило, что во время измерений в районе СГ-7 произошла солнечная вспышка М7.1, а за два часа до начала измерений была вспышка класса X1.9. Таким образом, измерения в районе СГ-7 проходили в условиях возмущенного состояния ионосферы, что, возможно, и привело к увеличению электрической компоненты поля на частотах 41-188 Гц.

Данные наблюдений и их интерпретация

На рис. 1 показаны спектры мощности сигналов СНЧ антенны в окрестностях скважины СГ-6 в зависимости от частоты.



Несмотря на высокий уровень промышленных помех, полностью искаживших спектр естественного поля, сигналы СНЧ-источника отчетливо проявились как по магнитным так и по электрическим компонентам. Запись выполнена 23.09.2011 с 16-00 до 17-00 Мск. Спектры получены со скользящим окном Блэкмана-Харриса с перекрытием в 47%, ширина окна 131072 отсчета. Частота дискретизации 500 Гц.

При измерениях 24.09.2011 с 16-00 по 17-00 Мск в районе СГ-7 уровень помех значительно уменьшился (рис. 2). Это позволило наряду с обработкой сигнала СНЧ-источника выделить и обработать спектры аудиомэгнитотеллурического (АМТ) поля естественного происхождения и получить оценки компонент тензора импеданса.

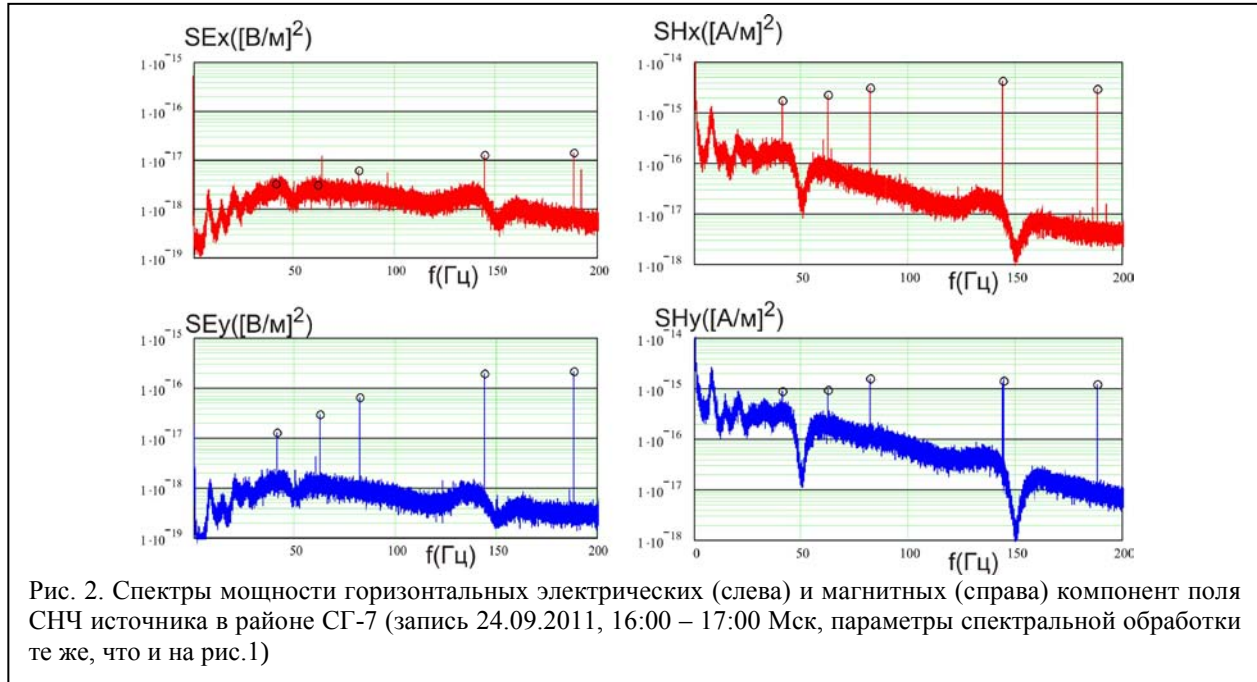


Рис. 2. Спектры мощности горизонтальных электрических (слева) и магнитных (справа) компонент поля СНЧ источника в районе СГ-7 (запись 24.09.2011, 16:00 – 17:00 Мск, параметры спектральной обработки те же, что и на рис.1)

По измеренным значениям амплитуд компонент горизонтального электрического поля на частотах СНЧ-источника (показаны кружками на рис. 1 и 2) определялось кажущееся удельное сопротивление.

Основные этапы обработки:

1) определение амплитуды компонент поля по спектрам мощности $SE_j, SH_j, j = x, y$, сигнала СНЧ-источника на заданных частотах ($f = 41, 62, 82, 144, 188$ Гц): $E_j = \sqrt{SE_j}$; $H_j = \sqrt{SH_j}$; $j = x, y$

2) вычисление значения кажущегося сопротивления по электрическим компонентам поля:

$$\rho_{Ej} = \frac{K_j E_j}{I_j}; j = x, y.$$

Здесь E_j – амплитуды компонент электрического поля на данной частоте f . Геометрические коэффициенты вычисляем по формулам для дальней зоны [4, 1980; 2, 1997]: для меридиональной компоненты электрического поля (ортогональной источнику),

$$K_x = \frac{2\pi r^3}{3 \sin(\varphi) \cos(\varphi) |AB|} \quad (1)$$

для широтной компоненты электрического поля (параллельной источнику)

$$K_y = \frac{2\pi r^3}{(3 \cos(\varphi)^2 - 2) |AB|} \quad (2)$$

Азимутальный угол $\varphi = 96^\circ$ для СГ -6 и $\varphi = 100^\circ$ для СГ -7 – отсчитывается от оси источника, $|AB|$ – дипольный момент источника длины $|AB| = 60$ км, I сила тока на данной частоте (около 100–200 А), $r = 1890$ км – расстояние от центра источника до СГ-6, и $r = 1740$ км – расстояние от центра источника до СГ-7.

Компоненты тензора импеданса по данным АМТ рассчитывались по алгоритму В.Ю. Семенова [7]. По ним определялось кажущееся сопротивление и фаза. Для поля СНЧ-источника по импедансным отношениям $Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y}$ и $Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x}$ определялось кажущееся сопротивление $\rho_{Zxy} = \frac{|Z_{xy}|^2}{\omega \mu_0}$ и $\rho_{Zyx} = \frac{|Z_{yx}|^2}{\omega \mu_0}$. По полученным импедансным характеристикам решалась обратная задача, и определялся геоэлектрический разрез в точке регистрации. Обратная задача решалась методом сопряженных градиентов с оценкой частных производ-

ных центральными разностями и квадратичной экстраполяцией экстремума целевой функции. Невязка оценивалась по формуле:

$$S(\rho, \varphi, \rho_0, \varphi_0, \Delta\rho, \Delta\varphi) = \frac{1}{N_\omega - 1} \left[\sum_{j=0}^{N_\omega} \left(\frac{\log\left(\frac{\rho_j}{\rho_0}\right)}{\Delta\rho_j / \rho_j} \right)^2 + \sum_{j=0}^{N_\omega} \left(\frac{\varphi_j - \varphi_0}{\Delta\varphi_j} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Здесь ρ_j, φ_j – измеренные значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса с абсолютными погрешностями $\Delta\rho_j$ и $\Delta\varphi_j$, величины ρ_0, φ_0 – решение прямой задачи – вычисленные значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса на заданном множестве частот ω_j , $j = 0, \dots, N_\omega$ для модели с заданными параметрами – мощностями слоев и их удельным сопротивлением. Решение прямой задачи вычислялось по рекуррентным формулам для модели Тихонова-Каньяра [1].

$$\begin{aligned} Z_N &= \frac{\omega\mu_0}{k_N} \\ Z_p &= \frac{\omega\mu_0}{k_p} \frac{\left(1 + \frac{k_p}{\omega\mu_0} Z_{p+1}\right) - \left(1 - \frac{k_p}{\omega\mu_0} Z_{p+1}\right) \exp(2i \cdot k_p t_p)}{\left(1 + \frac{k_p}{\omega\mu_0} Z_{p+1}\right) + \left(1 - \frac{k_p}{\omega\mu_0} Z_{p+1}\right) \exp(2i \cdot k_p t_p)} \\ k_p &= \sqrt{i\omega\mu_p\mu_0(\sigma_p + i\varepsilon_p\varepsilon_0)} \\ \rho_0(\omega) &= \frac{|Z_1(\omega)|^2}{\omega\mu_0} \\ \varphi_0(\omega) &= \arg(Z_1(\omega, M)) \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$ Ф/м, $c \approx 2.998 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $p = 1, \dots, N$ – номер слоя, параметры p -го слоя: t_p – мощность, σ_p – удельная электропроводность, и ε_p, μ_p – относительная диэлектрическая и относительная магнитная проницаемости, $M = \{t, \sigma, \varepsilon, \mu\}$ – модель среды, на поверхности которой определяется импеданс.

Стартовая модель для Земли – однородное полупространство, удельное сопротивление которого определяется средним геометрическим от полученных значений кажущегося сопротивления после медианного сглаживания со скользящим окном по множеству периодов $\{T\}$. Среднеквадратичные отклонения значений кажущегося сопротивления и фазы импеданса в пределах окна определяют погрешность измерений. Ширина окна сглаживания задавалась как $\Delta T = 10^b$, где показатель степени $b = \frac{\log(2\max\{T\}) - \log(\min\{T\}/2)}{\sqrt{2 N_\omega}}$.

По найденным, таким образом, моделям были вычислены значения компонент электрического поля и кажущегося сопротивления по ним для простейших моделей ионосферы двумя способами. Сначала использовался алгоритм решения прямой задачи для горизонтального электрического диполя (ГЭД) в горизонтально-слоистых средах [8]. Однако значения кажущегося сопротивления по компонентам электрического поля лежали гораздо ниже, чем было получено в измерениях. И для удовлетворительного согласия вычисленных и измеренных значений поля требовалось допущение о очень низко расположенной и хорошо проводящей ионосфере. По всей видимости, расхождение измеренных значений кажущегося сопротивления и результатов решения прямой задачи в классе однородно-слоистых моделей связано с неучтенным влиянием геоэлектрического разреза под источником. Дело в том, что СНЧ – источник расположен на плохо проводящем Мурманском блоке Фенноскандинавского (Балтийского) щита. Геоэлектрический разрез для этого блока характеризуется средним уровнем удельного сопротивления 10^5 Ом·м, что почти на 3 порядка превышает средний уровень сопротивления в точках регистрации СНЧ – сигналов в окрестностях СГ-6 и СГ-7. Для учета влияния геоэлектрического разреза под источником и ионосферы на компоненты поля использовалось представление, используемое в теории распространения радиоволн КНЧ-СНЧ диапазона в условиях волновода земля-ионосфера [13, 10]. Вычисления выполнялись по следующим формулам в приближении регулярного волновода (с резкими границами) для изотропных однородно слоистых моделей электропроводности Земли и ионосферы:

$$\begin{aligned}
 E0_\theta &= \frac{iP\eta}{2kha^2} \cos(\varphi) \left\{ \Delta_{gs}\Delta_{gr} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_n^e}{S_n^2} \Phi_{\theta\theta}(\nu, \theta) \right) + \frac{1}{\sin(\theta)} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_m^h}{S_m^2} \Phi_{\theta}(\mu, \theta) \right) \right\} \\
 E0_\varphi &= \frac{iP\eta}{2kha^2} \sin(\varphi) \left\{ \frac{\Delta_{gs}\Delta_{gr}}{\sin(\theta)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_n^e}{S_n^2} \Phi_{\theta}(\nu, \theta) \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_m^h}{S_m^2} \Phi_{\theta\theta}(\mu, \theta) \right) \right\} \\
 H0_\theta &= \frac{iP \cdot \sin(\varphi)}{2kha^2} \left\{ \frac{\Delta_{gs}}{\sin(\theta)} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_n^e}{S_n^2} \Phi_{\theta\theta}(\nu, \theta) \right) + \frac{1}{\Delta_{gr}} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_m^h}{S_m^2} \Phi_{\theta}(\mu, \theta) \right) \right\} \\
 H0_\varphi &= \frac{iP\eta}{2kha^2} \sin(\varphi) \left\{ \Delta_{gs} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_n^e}{S_n^2} \Phi_{\theta}(\nu, \theta) \right) + \frac{1}{\Delta_{gr} \cdot \sin(\theta)} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\Lambda_m^h}{S_m^2} \Phi_{\theta\theta}(\mu, \theta) \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Здесь φ – азимутальный угол на точку наблюдения из центра источника относительно его оси. Величина θ определяется расстоянием по поверхности Земли от источника до точки наблюдения по большому кругу $\theta = r/a$. Величина $a = 6370$ км – радиус земного шара, $\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ – импеданс свободного пространства, h – высота приземного слоя воздуха (тропосфера) с проводимостью σ_0 , $k = \sqrt{i\omega\mu_0(\sigma_0 + i\epsilon_0)}$ – волновое число в приземном слое воздуха, Δ_{gs}, Δ_{gr} – приведенный импеданс Земли под источником и точкой наблюдения. Коэффициенты возбуждения электрических и магнитных мод

$$\Lambda_n^e = \left(1 + \frac{\sin(2kC_n h)}{2kC_n h} \right)^{-1}; \quad n = 0, \dots, \infty,$$

$$\Lambda_m^h = \Delta_g^2 C_m^2 \left(1 - \frac{\sin(2kC_m h)}{2kC_m h} - \Delta_g^2 C_m^2 \left(1 + \frac{\sin(2kC_m h)}{2kC_m h} \right) - i \frac{\Delta_g}{kh} (\cos(2kC_m h) - 1) \right)^{-1}; \quad m = 0, \dots, \infty.$$

В первом приближении (однородной ионосферы с резкой границей на высоте h)

$$S_n = \sqrt{1 - C_n^2}, \quad C_n = \frac{n\pi}{2kh} + \sqrt{\left(\frac{n\pi}{2kh} \right)^2 - \frac{i(\Delta_g + \Delta_i)}{kh}}; \quad \Delta_i, \Delta_g - \text{приведенные импедансы ионосферы и Земли.}$$

Комплексные аргументы сферической функции ν, μ – находим как решения уравнения $S_{n,m}^2 = \frac{\nu(\nu+1)}{k^2 a^2}$.

Сферическая функция $\Phi(\nu, \theta)$ вместе с производными по переменной θ определяется через функцию Лежандра:

$$\begin{aligned}
 \Phi(\nu, \theta) &= \frac{P_\nu(\cos(\pi - \theta))}{\sin(\nu\pi)}, \quad P_\nu(\cos(\theta)) = \frac{2}{\pi} \int_0^\theta \frac{\cos\left(\left(\nu + \frac{1}{2}\right)t\right)}{\sqrt{2(\cos(t) - \cos(\theta))}} dt \\
 \Phi_\theta(\mu, \theta) &= \frac{\partial P_\nu(\cos(\pi - \theta))}{\sin(\nu\pi) \partial \theta}, \quad \Phi_{\theta\theta}(\mu, \theta) = \frac{\partial^2 P_\nu(\cos(\pi - \theta))}{\sin(\nu\pi) \partial \theta^2}
 \end{aligned}$$

Переход к локальной декартовой системе координат в точке наблюдения выполняется путем поворота на заданный угол α .

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_\theta \\ A_\varphi \end{pmatrix},$$

Здесь $A = E0, H0$ – горизонтальные компоненты поля источника, α – угол между осью источника (направление θ) и осью Ox локальной декартовой системы координат в точке наблюдения.

По рассчитанным таким образом компонентам поля определяются значения кажущегося сопротивления.

По компонентам электрического поля

$$\rho 0_{Ej} = \frac{K_j E0_j}{P}; \quad j = x, y, \tag{6}$$

$$K_x = \frac{2\pi r^3}{3 \sin(\varphi) \cos(\varphi)}, \quad K_y = \frac{2\pi r^3}{3 \cos(\varphi)^2 - 2}$$

По импедансным отношениям

$$\begin{aligned}
 Z\zeta 0_{xy} &= \frac{E0_x}{H0_y}, \quad Z\zeta 0_{yx} = \frac{E0_y}{H0_x} \\
 \rho\zeta 0_{zxy} &= \frac{|Z\zeta 0_{xy}|^2}{\omega\mu_0}, \quad \rho\zeta 0_{zyx} = \frac{|Z\zeta 0_{yx}|^2}{\omega\mu_0} \\
 \varphi\zeta 0_{zxy} &= \arg(Z0_{xy}), \quad \varphi\zeta 0_{zyx} = \arg(Z0_{yx})
 \end{aligned} \tag{7}$$

Решение обратной задачи – определение параметров модели геоэлектрического разреза земной коры в точке наблюдений и параметров модели электропроводности ионосферы проводится в два этапа. На первом этапе уточняется модель, полученная по данным АМТ, с использованием только импедансных отношений, которые согласно граничным условиям Леонтовича определяются свойствами только слоев залегающих ниже границы Земля-воздух в точке наблюдения. Здесь используется тот же алгоритм решения обратной задачи, что и для главных компонент тензора импеданса по измерениям АМТ - поля, с той лишь разницей, что решение

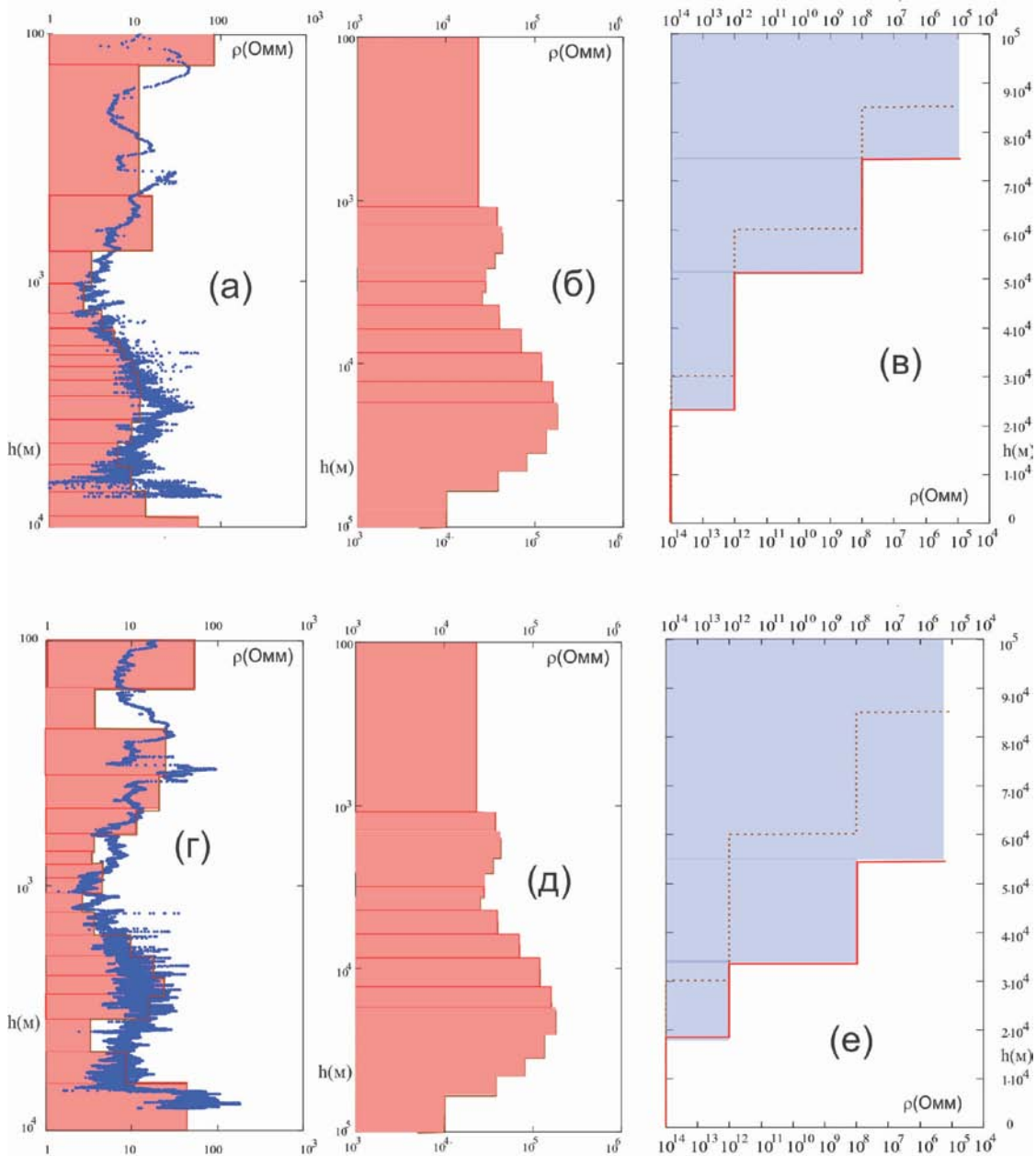


Рис. 3. Модели геоэлектрического разреза по результатам измерений в окрестности СГ-6: (а) – в пункте регистрации сигнала, точками показаны данные каротажа, (б) – в расположении источника СНЧ-излучения – зависимость удельного сопротивления (Ом · м) с глубиной $h(м)$ от поверхности земли, (в) – модель электрического разреза атмосферы – распределение удельного сопротивления (Ом·м) с высотой $h(м)$ над землей; (г), (д), (е) – то же в окрестности СГ-7. Пунктиром на (в) и (е) показано начальное приближение для модели ионосферы.

прямой задачи вычисляется по формулам (7). На втором этапе при заданных параметрах модели геоэлектрического разреза под источником ищутся параметры ионосферы. На рис. 3 представлены решения обратной задачи в точках наблюдения сигналов СНЧ - источника в окрестностях сверхглубоких скважин СГ-6 и СГ-7.

На первом этапе искалось решение обратной задачи – модель геоэлектрического разреза в точке регистрации в районе СГ-7, где получена наиболее полная кривая АМТ-зондирования благодаря низкому уровню промышленных помех. Полученное решение, для которого невязка имеет минимальное значение представлено на рис. 3(г). Здесь же показаны результаты измерений удельного сопротивления в стволе скважины [5]. Построенная модель использовалась в качестве стартовой при интерпретации результатов в районе СГ-6. Итог инверсии показан на рис. 3(а). На втором этапе, для полученных моделей, вычислялись амплитуды компонент поля источника и кажущееся сопротивление по ним для электрической модели ионосферы. Параметры модели электропроводности ионосферы корректировались с целью минимизация невязки для удельного сопротивления по электрическим компонентам поля СНЧ - источника. При этом параметры модели распределения удельного сопротивления под источником для обеих точек наблюдений использовались одни и те же (рис. 3 (б, д)). Верхний слой мощностью 100 м и интегральной проводимостью 1.7 См учитывает влияние приповерхностных неоднородностей вдоль трассы распространения СНЧ - сигнала. Нижняя часть данной модели (глубже 100 м) использовалась ранее в качестве «нормальной» при интерпретации результатов электромагнитных зондирований на территории плохо проводящих однородных блоков Фенноскандинавского (Балтийского) щита [6].

На рис. 3 показаны модели, полученные в ходе инверсии данных АМТ наблюдений и измерений поля СНЧ – источника в точках наблюдений (а, г) с учетом геоэлектрического разреза под источником (модели б, д) и электрических свойств тропосферы, стратосферы и нижней ионосферы (слой D) (в, е) в районе СГ-6 и СГ-7 соответственно.

При инверсии подбирались только мощности и удельные проводимости слоев, относительные магнитная и диэлектрические проницаемости всюду приняты равными единице. Невязка для кажущегося сопротивления по компонентам электрического поля определялась выражением:

$$S(\rho_{Ex}, \rho_{Ey}, \rho_{0Ex}, \rho_{0Ey}, \Delta\rho_{Ex}, \Delta\rho_{Ey}) = \frac{1}{N_{\omega} - 1} \left\{ \sum_{n=0}^{N_{\omega}} \left(\frac{\log \left(\frac{\rho_{Exj}}{\rho_{0Exj}} \right)}{\Delta\rho_{Exj} / \rho_{Exj}} \right)^2 + \sum_{n=0}^{N_{\omega}} \left(\frac{\log \left(\frac{\rho_{Eyj}}{\rho_{0Eyj}} \right)}{\Delta\rho_{Eyj} / \rho_{Eyj}} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

Решение прямой задачи вычислялось по формулам (6). Минимизация невязки выполнялась методом сопряженных градиентов. Вычисленные и измеренные кажущиеся сопротивления представлены на рис. 4.

Решение прямой задачи для электрического поля СНЧ-источника показано коричневым пунктиром для СГ-6 и черной штриховой линией для СГ-7. Решение прямой задачи для импедансных отношений поля СНЧ-сигнала и АМТ-поля показаны красной сплошной линией для СГ-6 и синей сплошной для СГ-7. Барами показана абсолютная погрешность измерений. На левых панелях (а, в) – для компонент E_x , H_y , на правых (б, г) – E_y , H_x .

Результаты измерений кажущегося сопротивления по импедансным отношениям – черные жирные точки для СГ-6 и голубые жирные точки для СГ-7; по горизонтальным компонентам электрического поля СНЧ-источника – розовые жирные точки для СГ-6 и пустые черные ромбы для СГ-7. Здесь же представлены измеренные значения для кажущегося сопротивления и фазы главных компонент тензора импеданса – розовые пустые ромбы для СГ-7 и коричневые пустые кружки для СГ-6.

В качестве стартовой для электрической модели ионосферы принималась четырехслойная модель (табл. 1). Начальное приближение получено методом подбора для решения обратной задачи с невязкой для удельного сопротивления по электрическим компонентам поля СНЧ-источника для точки в окрестности СГ-6.

Таблица 1

Стартовая модель электрических свойств тропосферы и стратосферы – слой с номером 0 и нижней ионосферы (слой D) – слои выше нижней границы слоя с номером 1.

№ слоя	Мощность слоя t (км)	Высота h (км) до нижней границы слоя	Удельное сопротивление (Ом·м)
	СГ-6, СГ-7	СГ-6, СГ-7	СГ-6, СГ-7
0	30	0	10^{14}
1	30	30	10^{12}
2	25	60	10^8
3	∞	85	10^5

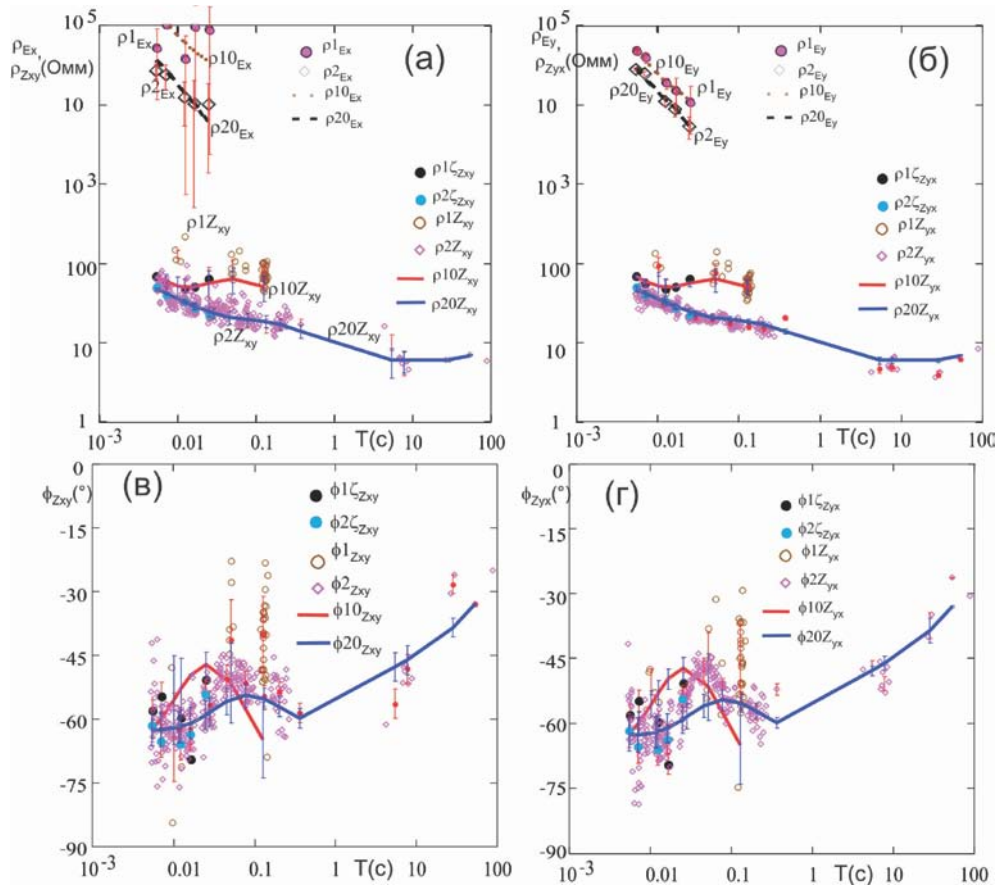


Рис. 4. (а, б) – Кажущееся сопротивление в зависимости от периода T по результатам измерения электрических компонент поля ρ_{Ej} ; $j = x, y$ поля и главных компонент тензора импеданса $\rho_{Zi,j}$; $i, j = x, y$ по данным АМТ и поля СНЧ-источника. Здесь же показано решение прямой задачи ρ_{0Ej} и $\rho_{0Zi,j}$ для моделей, представленных на рис. 3; (в, г) – фазы главных компонент тензора импеданса $\varphi_{Zi,j}$; $j = x, y$ по данным АМТ и по полю СНЧ-источника. Индексы 1 – данные измерений в окрестности СГ-6, 2 – то же для СГ-7, 0 – результаты решения прямой задачи, ζ – данные получены с СНЧ-источником.

Применимость одномерной модели ионосферы обусловлена тем, что трасса СНЧ-сигнала от источника до точки наблюдения не пересекала терминатор и проходила в субширотном направлении.

В итоге инверсии с невязкой (8) для тропосферы, стратосферы и нижней ионосферы получено две существенно различающиеся модели (табл. 2). Модели отличаются, главным образом, по мощностям (высоте до нижней границы слоя). При этом расчет компонент поля по обеим моделям дает удовлетворительное согласие результатов вычислений и измеренных значений, в пределах погрешности наблюдений для главных компонент сигнала (рис. 5).

Таблица 2

Модели электрических свойств ионосферы в районе СГ-6 и СГ-7

№ слоя	Мощность слоя $t(\text{км})$		Высота $h(\text{км})$ до нижней границы слоя		Удельное сопротивление (Ом·м)	
	СГ-6	СГ-7	СГ-6	СГ-7	СГ-6	СГ-7
1	23	18	0	0	10^{14}	10^{14}
2	28	15	23	18	10^{12}	10^{12}
3	23	21	51	33	10^8	$9 \cdot 10^7$
4	∞	∞	74	54	$8 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^5$

На рис. 5 представлено сопоставление измеренных и вычисленных по полученным моделям значения спектров амплитуд горизонтальных компонент поля СНЧ-источника в точке СГ-7. Измеренные и вычисленные значения главных компонент – электрической широтной (направленной вдоль источника) E_y , и магнитной меридиональной (ортогональной оси источника) H_x демонстрируют хорошее согласие. Расхождение измеренных

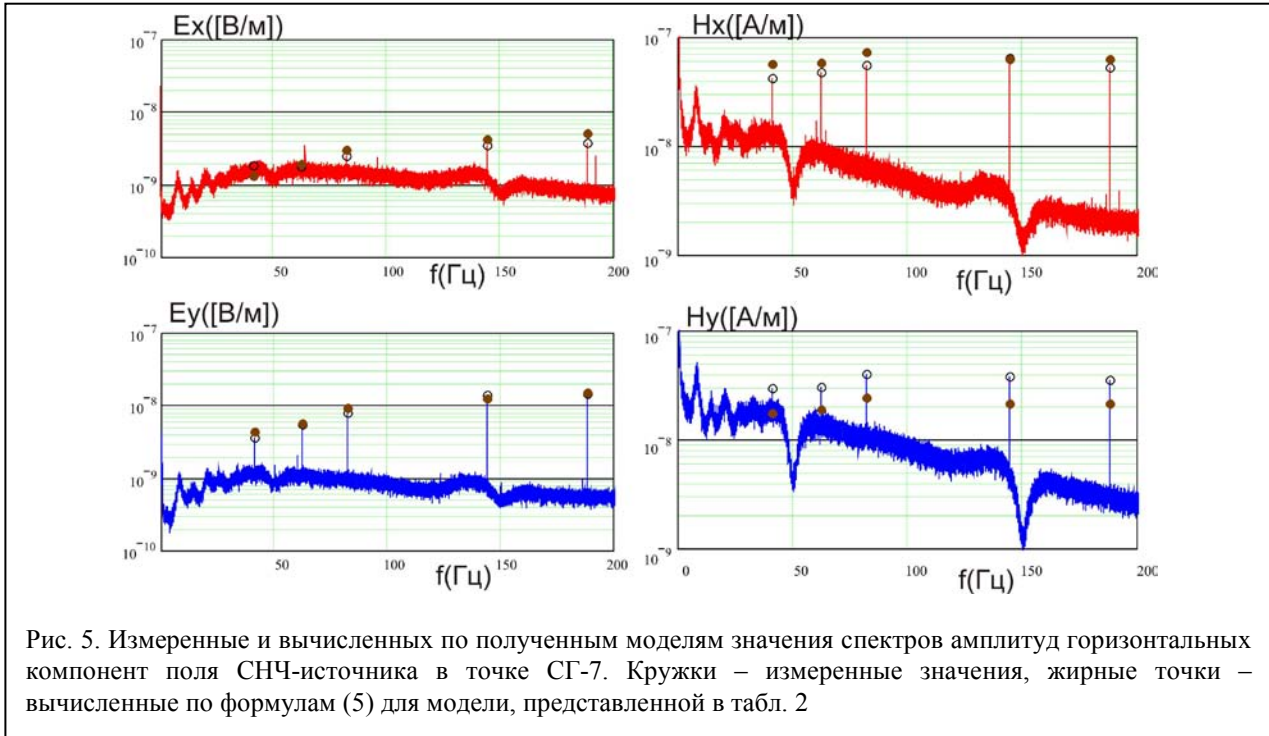


Рис. 5. Измеренные и вычисленных по полученным моделям значения спектров амплитуд горизонтальных компонент поля СНЧ-источника в точке СГ-7. Кружки – измеренные значения, жирные точки – вычисленные по формулам (5) для модели, представленной в табл. 2

и вычисленных значений дополнительных компонент поля – электрической меридиональной E_x и магнитной широтной H_y , связаны, по всей видимости, с анизотропией стенок волновода, которая в ионосфере вызвана действием магнитного поля Земли, а в самой Земле – особенностями геологического строения [5].

На рис. 6 на правой панели (б) показаны результаты решения обратной задачи для кажущегося сопротивления по компонентам электрического поля. Пунктиром показана стартовая модель (табл. 1), красная сплошная – итоговая модель по данным для СГ-6 («нормальная» ионосфера), синяя штриховая линия – итоговая модель

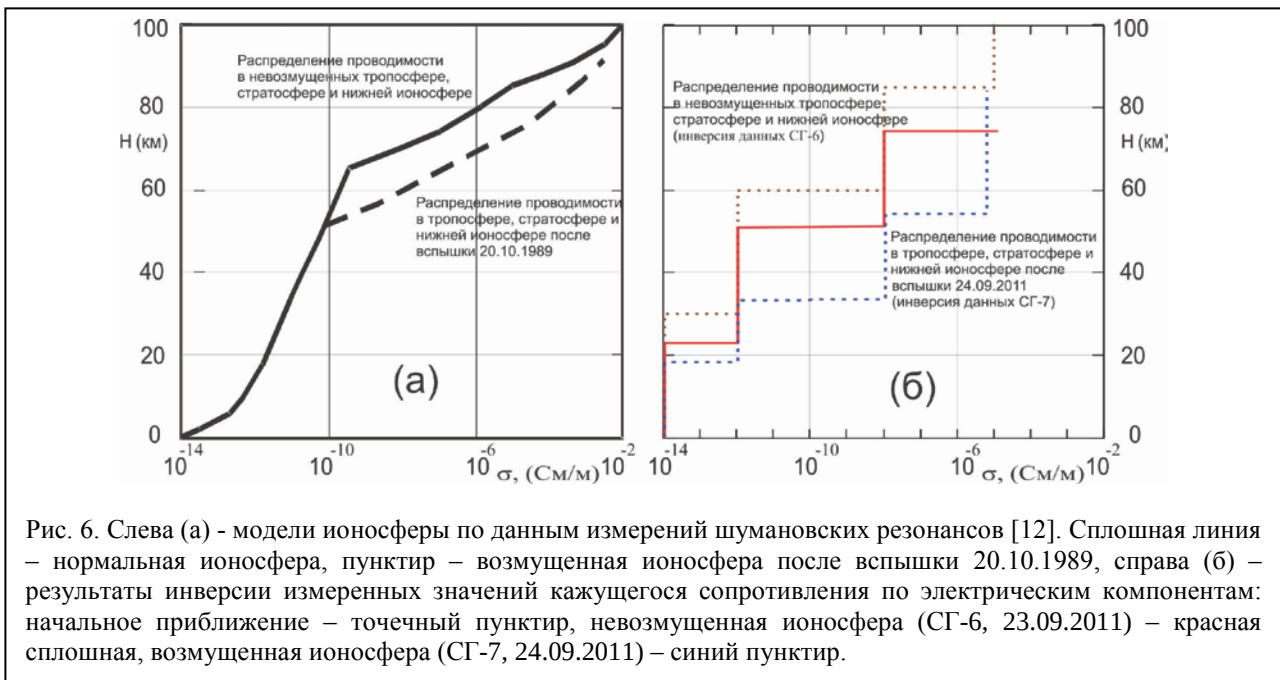


Рис. 6. Слева (а) - модели ионосферы по данным измерений шумановских резонансов [12]. Сплошная линия – нормальная ионосфера, пунктир – возмущенная ионосфера после вспышки 20.10.1989, справа (б) – результаты инверсии измеренных значений кажущегося сопротивления по электрическим компонентам: начальное приближение – точечный пунктир, невозмущенная ионосфера (СГ-6, 23.09.2011) – красная сплошная, возмущенная ионосфера (СГ-7, 24.09.2011) – синий пунктир.

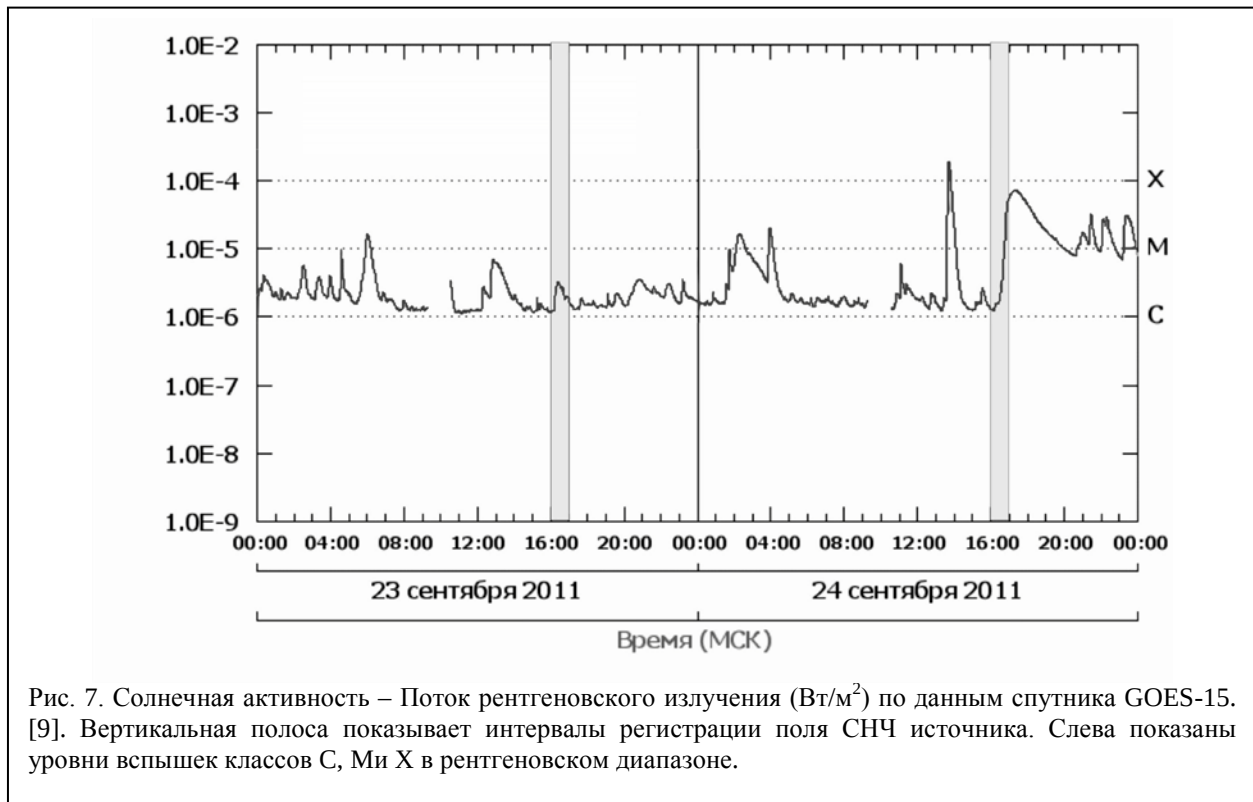
для СГ-7 («возмущенная» ионосфера – табл. 2). В целом модель для данных, полученных в районе СГ-7, характеризуется существенно меньшим значением высоты до ионосферы – для СГ-7 $H=74$ км, а для СГ-6 $H=54$ км. Для объяснения данного расхождения была предложена гипотеза о возрастании солнечной активности с 23 по

24 сентября 2011 г. и возмущении параметров волновода Земля-ионосфера под ее действием. Косвенным подтверждением данной гипотезы было, выявленное в ходе предварительного анализа данных, значительное увеличение амплитуд пульсаций на сопряженных горизонтальных магнитных и электрических компонентах с высокой степенью когерентности, зарегистрированное в ходе измерений СНЧ - сигнала.

Ранее распределение электропроводности в ионосфере для возмущенного и невозмущенного распределений электропроводности тропосферы, стратосферы и ионосферы рассматривались на основе изучения резонансов Шумана [12]. Представленные в этой работе градиентные модели также характеризуются уменьшением высоты для возмущенной ионосферы (рис. 6,а).

Объяснением столь быстрого изменения свойств нижней ионосферы (слой D) – сразу после вспышки и непосредственно во время ее может быть увеличение степени ионизации молекул воздуха под действием солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения [11].

Гипотеза влияния солнечной активности нашла подтверждение благодаря данным спутниковых измерений потока рентгеновского излучения Солнца (спутник GOES-15) представленных на рис. 7. По оси ординат отложены значения потока рентгеновского излучения (Вт/м^2), а по оси абсцисс – московское время (Мск). Здесь вертикальной серой полосой показаны временные интервалы измерений СНЧ- сигналов 23 и 24 сентября 2011 г. Начало регистрации 16:00, окончание 17:00 Мск. Таким образом, 24 сентября за 2 часа до начала измерений произошла мощная вспышка класса X1.9, затем непосредственно в ходе измерений началась вспышка класса M 7.8, которая достигла своего максимума уже после окончания измерений в 17:20 Мск.



Заключение.

Таким образом, влияние солнечной активности, приводящее к повышению ионизации атмосферы в нижней ее части, видимо, позволяет объяснить значительное уменьшение оценок высоты до нижней ионосферы, выявленное в ходе интерпретации результатов измерений СНЧ -сигнала 24 сентября 2011 г. Дальнейшее развитие описанного алгоритма определения параметров ионосферы связано с учетом влияния магнитного поля Земли на электропроводность ионосферы и учета анизотропии ионосферы и земной коры. Этот подход, в принципе, позволяет выполнять частотное зондирование верхнего полупространства в СНЧ- диапазоне при расстояниях от источника свыше 300 км и известных параметрах геоэлектрического разреза под источником. При регулярной работе СНЧ-источника и сети стационарных точек наблюдений можно осуществлять мониторинг параметров ионосферы для прогнозирования характеристик волновода, что возможно имеет практический интерес с точки зрения дальней радиосвязи с погруженными объектами.

Кроме того, качественное и количественное совпадение расчетных и измеренных данных для кажущегося сопротивления по импедансу, а так же согласие с данными каротажных измерений в сверхглубоких скважинах

СГ-6 и СГ-7 позволяет сделать вывод о возможности использовать построенные модели геоэлектрического разреза в качестве нормальных моделей электропроводности при поиске и разведке полезных ископаемых в данном регионе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (13-05-12044-офи-м) и от РАН (проект ОНЗ, № 6).

Список литературы

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурическое зондирование горизонтально-однородных сред. М.: Недра, 1992. 250 с.
2. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.
3. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., 4 А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ - диапазона. // Доклады Академии Наук. 1994. Т. 338. № 1. С. 106-109.
4. Вешев А.В. (1980) Электромагнитное профилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра. 1980. 391 с.
5. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Селиванов В.Н., Есипко О. А., Копытенко Е.А., Григорьев В.Ф. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин СГ-6 и СГ-7 в полях естественных и мощных контролируемых источников. // ДАН РАН. 2012. Т. 445. № 2. С. 205–209.
6. Жамалетдинов А.А. Электропроводность земной коры территории России и сопредельных стран. // Ученые записки СПбГУ. Вопросы геофизики. 2006. Вып. 39. С. 69 – 90.
7. Семенов В. Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра, 1985. 133 с.
8. Boerner D.E., West G.F. A generalized representation of the electromagnetic fields in layered earth. // Geophysical Journal. 1989. N. 97. P. 529-548,
9. http://www.tesis.lebedev.ru/upload_test/files/flares_20110924.png
10. Pan, Wei-Yan, Li, Kai. Propagation of SLF/ELF Electromagnetic Waves.//Advanced Topics in Science and Technology in China. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014. DOI 10.1007/978-3-642-39050-0. 265 p
11. Qian L; Burns A.G., Chamberlin P.C., Solomon S.C. Variability of thermosphere and ionosphere responses to solar flares. //Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116. N. A10. - CiteID A10309.
12. Schlegel K. and Fullekrug M. 50 Years of Schumann Resonance. Physik in Unserer Zeit. 2002. N. 33. P. 256-264.
13. Wait J.R. Earth-Ionosphere Cavity Resonances and the Propagation of ELF Radio Waves // RADIO SCIENCE Journal of Research NBSJUSNC-URSI. V. 69D. N. 8. August 1965. P. 1057–1070.

О понятии волновой зоны КНЧ-СНЧ электромагнитного поля за пределами квазистационарного приближения

А.А. Жамалетдинов, А.Н. Шевцов

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, zham@abd.mail.ru

Фундаментальной моделью, используемой при частотных электромагнитных зондированиях с контролируруемыми источниками, является дипольный источник (электрический или магнитный), расположенный на плоской границе раздела между двумя однородными полупространствами – воздухом, имеющим бесконечно высокое сопротивление, и проводящей землей. Идея частотного электромагнитного зондирования впервые была рассмотрена в докторской диссертации А.П. Краева в конце 40-х годов [8]. В 50-е годы большой объем расчетно-теоретических исследований в этой области был выполнен Л.Б. Гасаненко (1958). Но путевку в жизнь метод частотного зондирования получил благодаря основополагающей работе Л.Л. Ваньяна [2]. В ней он обосновал идею частотного зондирования в квазистационарном приближении.

Волновое число в общем виде (без выделения квазистационарной области) для плоской однородной электромагнитной волны с гармонической зависимостью от времени вида $A = A_0 \cdot e^{-i\omega t}$ можно записать как

$$k_0 = \sqrt{-i\omega\mu_0\sigma_0 + \omega^2\varepsilon_0\mu_0} \text{ в воздухе и } k_e = \sqrt{-i\omega\mu_e\mu_0\sigma_e + \omega^2\varepsilon_e\varepsilon_0\mu_0} \text{ в земле,} \quad (1)$$

где: $\omega = 2\pi f$ (радиан/с) - круговая частота, σ_0 (См/м) - удельная электропроводность воздуха, σ_e (См/м) - удельная электропроводность земли, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) - абсолютная магнитная проницаемость свободного пространства (вакуума), μ_e - относительная магнитная проницаемость земли, $\varepsilon_0 = (4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)^{-1}$ (Ф/м) - абсолютная диэлектрическая проницаемость свободного пространства (вакуума), ε_e - относительная диэлектрическая проницаемость земли.

Комплексное волновое число в квазистационарном приближении имеет вид $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma} = (1+i) \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = (1+i) \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$, где $\lambda = \sqrt{\frac{4\pi T}{\mu\sigma}} = \sqrt{10^7 \rho T}$ - длина электромагнитной волны в земле с удельным электрическим сопротивлением ρ . Модуль волнового числа определяется выражением $|k| = \frac{2\pi\sqrt{2}}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{\rho} \right]$ и представляет собой пространственную частоту в виде отношения $2\pi\sqrt{2}$ радиан к длине волны $\lambda = \sqrt{10^7 \rho T}$. По величине приведенного расстояния $p = |k|r$, где r - расстояние между источником и приемником, принято выделять три зоны источника - ближнюю ($|k|r \ll 1$), среднюю (промежуточную) ($|k|r \approx 1$) и дальнюю, квазистационарную ($|k|r \gg 1$) [3]. В ближней зоне заземленного электрического диполя (при $|k|r \ll 1$) существуют только тороидальная магнитная мода (ТМ), создаваемая гальваническими токами, токами растекания [17]. В ближней зоне электрическое поле подчиняется закону Ома в дифференциальной форме и не зависит от частоты, но зависит от сопротивления и от расстояния до источника, тогда как магнитное поле зависит только от расстояния до источника и не зависит ни от частоты, ни от сопротивления. В промежуточной зоне электрическое и магнитное поля зависят от частоты, от сопротивления среды и расстояния до источника. Поле в промежуточной зоне описывается строгими формулами учитывающими влияние гальванических токов, протекающих в земле, и влияние индукционных токов, проникающих в землю через воздух. В частности, продольная относительно электрического диполя компонента электрического поля E_x зависит от частоты, сопротивления среды и расстояния до источника и описывается выражением (2) [7].

$$E_x = \frac{I \cdot l_{AB} \cdot \rho}{2\pi \cdot r^3} \cdot [3 \cdot \cos^2 \theta - 2 + e^{ikr} (1 - ikr)] \quad (2)$$

В дальней квазистационарной (квазиволновой) зоне горизонтального заземленного электрического диполя (как и вертикального магнитного), при $|k|r \gg 1$ гальванические токи в земле затухают, и в точку наблюдения поступает только индукционная полоидальная мода (ПМ), в которой линии поля имеют вид горизонтальных петель (замкнутых контуров) [2, 4]. При этом вид продольной относительно заземленного электрического диполя компоненты электрического поля упрощается. Она не зависит от частоты, но зависит от сопротивления среды и от расстояния до источника.

$$E_x = \frac{I \cdot l_{AB} \cdot \rho}{2\pi \cdot r^3} \cdot [3 \cdot \cos^2 \theta - 2] \quad (3)$$

Можно видеть, что электрическое поле в дальней квазистационарной зоне синфазно с источником, так как правая часть уравнения (3) вещественна. Это означает, прежде всего, что поле существует только до тех пор, пока существует ток в источнике, и затухает с его отключением. Вещественность правой части означает также, что электромагнитное поле практически одновременно поступает внутрь земли во всех точках дальней квазистационарной зоны, то есть ведет себя так же, как и поле плоской электромагнитной волны, применяемой в теории магнитотеллурических зондирований. Важным достоинством дальней квазистационарной зоны является то, что в ее пределах кажущееся сопротивление нижнего полупространства определяется с помощью выражения (4) путем введения геометрического коэффициента k_{Ex} , как это делается в методах электроразведки постоянным током.

$$\rho_k = \rho_\omega = k_{Ex} \cdot \frac{E_x}{I}, \quad (4)$$

$$\text{где } k_{Ex} = \frac{2\pi \cdot r^3}{(3 \cdot \cos^2 \theta - 2) \cdot l_{AB}}$$

Принятое выше определение поля горизонтального электрического (как и вертикального магнитного) диполя справедливо только в условиях квазистационарной аппроксимации, то есть при условии, если 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 ($r \gg \lambda_0$), то это означает, что поле распространяется вне квазистационарной аппроксимации, то есть распространяется в верхнем полупространстве в виде незатухающей волны, существующей 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, то есть волновые числа в земле и в воздухе должны учитываться согласно уравнениям (1). Упомянутое поведение первичного поля может быть проиллюстрировано уравнением (5) из работы Л.Б. Гасаненко [6] для азимутальной электрической компоненты поля вертикального магнитного диполя, имеющего более простой вид в сравнении с полем заземленного электрического диполя в связи с отсутствием тороидальной моды, существующей в поле электрического диполя в ближней и промежуточной зонах.

$$E_\phi = \frac{3JS\mu_0 i \omega}{2\pi^4 (k_e^2 - k_0^2)} \cdot \left[e^{-k_0 r} \left(1 + k_0 r + \frac{k_0^2 r^2}{3} \right) - e^{-k_e r} \left(1 + k_e r + \frac{k_e^2 r^2}{3} \right) \right] \quad (5),$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота в радианах в секунду;

J – сила тока в А; S – площадь рамки с током в m^2 .

Слагаемые в квадратных скобках в уравнении (5) интерпретируются как две волны – первая распространяется в верхнем полупространстве (в воздухе) с волновым числом k_0 и вторая – в нижнем полупространстве (в земле) с волновым числом k_e (уравнения 1). Вслед за [5] слагаемые в квадратных скобках назовем электрическими числами – в воздухе (e_a) и в земле (e_e). Их сумму обозначим

$$e_{all} = e_a + e_e$$

С удалением от источника поле в проводящей среде (в земле), вследствие поглощения электромагнитной энергии, быстро затухает по экспоненциальному закону. В квазистационарной волновой зоне (квазиволновой), где $|k_0|r \ll 1$ и $|k_e|r \gg 1$, экспоненты в уравнении (5) подчиняются неравенству $|e^{-k_0 r}| \gg |e^{-k_e r}|$. Электромагнитное поле в квазиволновой зоне достигает точки наблюдения по воздуху и, как отмечалось выше, 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 , равный углу между нормалью к земной поверхности и направлением распространения волны, определяется законом Снеллиуса: $\sin \alpha_e = \sin \alpha_0 \cdot \sqrt{\sigma_0 / \sigma_e}$ [3]. Поскольку $\sin \alpha_e \rightarrow 0$ при $\sigma_0 \ll \sigma_e$, то $\alpha_e \rightarrow 0$ и, следовательно, преломленная в земле волна при любом угле падения входящей волны распространяется вертикально вниз в

виде плоской волны с экспоненциальным затуханием по глубине Z . При этом сумма слагаемых в квадратных скобках $e_{all} = e_a + e_e$ в уравнении (5) стремится к единице. В этом случае горизонтальная компонента электрического поля в земле E_e , затухающая с глубиной по экспоненциальному закону, может быть описана выражением (6), вытекающим из одномерного уравнения Гельмгольца [4]

$$E_e = -\frac{3JS}{2\pi^4\sigma_e} \cdot e^{-2\pi \cdot z/\lambda_e}, \quad (6)$$

где Z – глубина проникновения поля в нижнее полупространство (в землю) и $\lambda_e = \sqrt{10^7 \rho T} = 2\pi\sqrt{2}/|k_e|$ – длина волны в земле, T – период в секундах.

При дальнейшем увеличении разноса, когда расстояние до источника r становится больше, чем длина волны в воздухе ($\lambda_0 = 2\pi\sqrt{2}/|k_0|$) 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. Интенсивность поля определяется уравнением (7), которое определяет особенности распространения электромагнитного поля в нижнем полупространстве с учетом влияния токов смещения.

$$E_\phi = \frac{3JS\mu_0 i\omega}{2\pi^4(k_e^2 - k_0^2)} \cdot \left[e^{-k_0 r} \left(1 + k_0 r + \frac{k_0^2 r^2}{3} \right) \right] \quad (7)$$

Таким образом, если отвлечься от условий промежуточной зоны ($|k|r \approx 1$), то, вслед за работой [13] поле контролируемого источника может быть подразделено на 3 зоны - (i) ближняя, стационарная зона ($|k_e|r \ll 1$, $|k_0|r \ll 1$); (ii) дальняя, квазиволновая (квазистационарная) зона ($|k_e|r \gg 1$; $|k_0|r \ll 1$) и (iii) волновая зона ($|k_e|r \gg 1$; $|k_0|r \gg 1$). Поведение электрических чисел e_a , e_e и e_{all} в зависимости от модуля волнового параметра $|k_0|r$ показано на рис. 1. Можно видеть, как по мере увеличения модуля $|k_0|r$ происходит последовательный переход от ближней зоны (i) к дальней квазистационарной зоне (квазиволновой) (ii) и затем к волновой зоне (iii).

Отличительной чертой глубинных электромагнитных зондирований с контролируемым источником, выполняемых в КНЧ-СНЧ диапазоне, является то, что дальняя квазистационарная зона проявляется на сравнительно низких частотах, поскольку зондирования выполняются на больших удалениях от источника, сопоставимых с длиной волны в воздухе (на удалениях в сотни и первые тысячи километров). Эта особенность электромагнитного поля в КНЧ-СНЧ диапазоне проиллюстрирована на примере расчетов по полной формуле (5) в условиях однородного пространства с сопротивлением 10^5 Ом·м на удалениях 100, 400 и 1600 км (рис. 2). Можно видеть, что на удалении 1600 км от источника волновая (волноводная) зона проявляется уже на частотах 100 Гц и выше.

Она обнаруживается по резкому возрастанию полного электрического числа e_{all} в связи с усиливающейся ролью токов смещения в распространении электромагнитного поля.

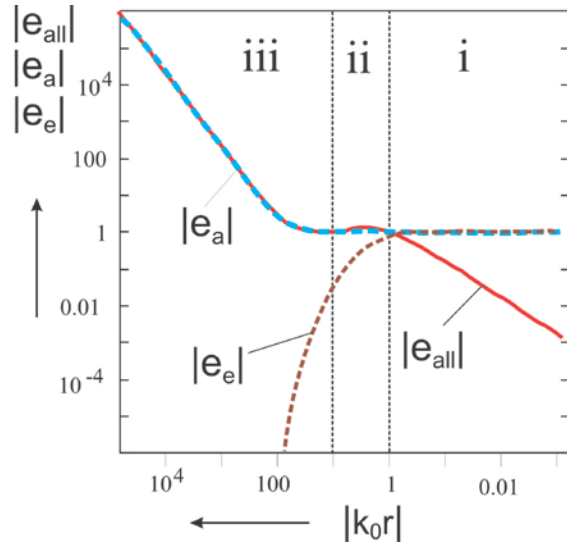


Рис. 1 Зависимость абсолютного значения электрических волновых чисел e_{all} , e_a и e_e от модуля волнового параметра $|k_0|r$

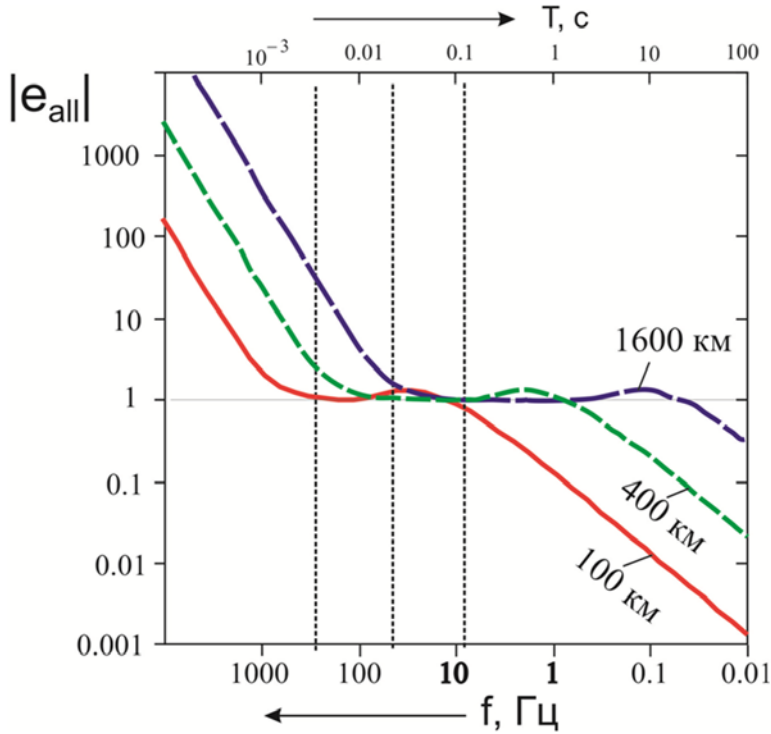


Рис. 2. Зависимость абсолютного значения электрического числа e_{all} от частоты (периода) на разных расстояниях от источника для $\sigma_e = 10^{-5}$ СМ/м.

Описанные выше характеристики КНЧ-СНЧ электромагнитных полей дополнительно осложняются влиянием проводящей ионосферы, расположенной на высотах от 60 до 150 км. Ее влияние зависит, главным образом, от высоты проводящего ионизированного слоя и его удельной электропроводности. Теоретическому рассмотрению этих вопросов посвящена обширная научная литература [20, 19, 15, 1, 14, 10].

Ниже рассмотрено решение прямой задачи распространения электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в горизонтально-слоистом пространстве. Решение распространяется на все зоны источника (стационарную, квазиволновую и волновую) с учетом влияния токов смещения и ионосферы. Программа разработана А.Н. Шевцовым [11, 12] на основе теоретических концепций описанных в работах [18, 16]. Решение одномерной прямой задачи основано на использовании матриц полоидальных и тороидальных мод распространения электромагнитного поля в многослойной среде [17].

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{I(\omega)}{4\pi} \int_0^\infty \tilde{F} \begin{bmatrix} \partial_{xx} \\ \partial_{xy} \\ \partial_x \\ \partial_y \\ 1 \end{bmatrix} \lambda J_0(\lambda \xi) d\lambda \quad (4)$$

Источник и приемник имеют цилиндрические координаты (r', ϕ', z') и (r, ϕ, z) , соответственно. Все пространство горизонтально слоистое со следующими параметрами каждого k -го слоя: σ_k - удельная электропроводность; ϵ_k - абсолютная диэлектрическая проницаемость, μ_k - абсолютная магнитная проницаемость и h_k - мощность. Все компоненты ЕМ поля в слоистом пространстве определены уравнением (4), приведенным выше [16; 14]. $[E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z]$ - обобщающий вектор компонентов электромагнитного поля, $I(\omega)$ - ток в источнике, зависящий от круговой частоты. Вектор $[\partial_{xx}, \partial_{xy}, \partial_x, \partial_y, 1]$ - символический вектор частных производных второго и первого порядка по координатам точки приема: $\partial_{xx} = \partial^2 / \partial x^2$, $\partial_{xy} = \partial^2 / \partial x \partial y$, $\partial_x = \partial / \partial x$, $\partial_y = \partial / \partial y$, и 1 - оператор идентификации, воздействующий на $J_0(m\xi)$ - функцию Бесселя первого рода, нулевого порядка, λ - переменная интегрирования. Величина $\xi = \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\phi - \phi')}$ - расстояние между источником и приемником в проекции на горизонтальную плоскость. $\tilde{F}(m)$ - матрица (6x5), зависящая от параметров горизонтально-слоистой модели и учитывающая граничные условия [17], ^{T} - операция транспонирования.

На рис. 3 приведен фрагмент расчетов для задачи частотного зондирования в поле электрического диполя.

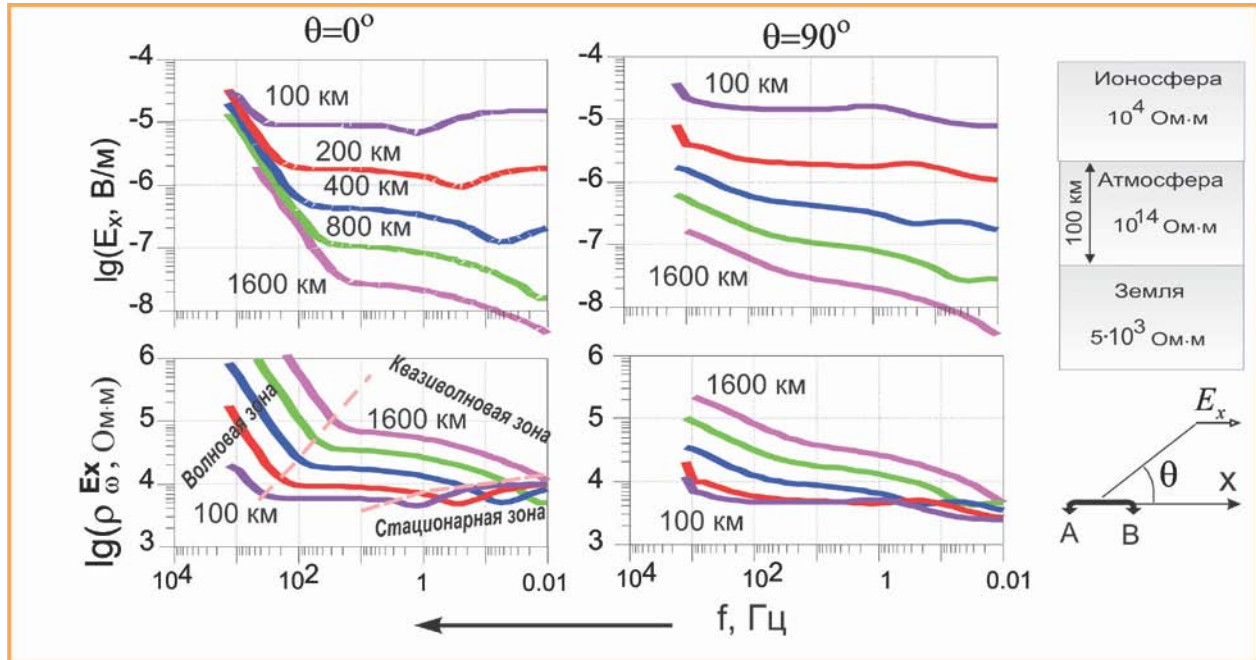


Рис. 3. Пример расчета поля заземленного электрического диполя (плоская слоистая модель) с учетом влияния ионосферы и токов смещения на разных удалениях от источника (от 100 до 1600 км).

Ближняя зона, стационарная $|k_e r| \ll 1$ $|k_0 r| \ll 1$. Волновая зона 1 рода, квазистационарная $|k_e r| \gg 1$ $|k_0 r| \ll 1$. Волновая зона 2 рода, истинно волновая $|k_e r| \gg 1$ $|k_0 r| \gg 1$.

Расчеты выполнены для поля заземленного электрического диполя ($L=100$ км, $I=100$ А) над однородным полупространством ($\rho=10^3$ Ом·м) с учетом ионосферы ($\rho=10^4$ Ом·м), отделенной от Земли слоем атмосферы мощностью 100 км и сопротивлением $\rho=10^{14}$ Ом·м. В верхней части рисунка 3 показаны кривые напряженности электрического поля E_x , в нижней части - кривые кажущегося сопротивления ρ_ω^{Ex} , рассчитанные для электрического поля E_x , продольного по отношению к оси диполя АВ.

В средней области частотного диапазона (от десятых долей до первой сотни Гц) на рисунке 3 наблюдается плавное увеличение кажущегося сопротивления с увеличением частоты и расстояния, вызванное влиянием ионосферы. Эта область выделена на рис. 3 как волновая квазистационарная зона (уравнение 6).

Выше 10-100 Гц наблюдается более быстрое увеличение кажущегося сопротивления, вызванное влиянием токов смещения, Эта область обозначена на рис. 3 как волновая зона (уравнение 7). Наиболее сильное влияние токов смещения (наиболее резкое увеличение поля с ростом частоты) наблюдается при размещении приемной линии на оси диполя АВ ($\theta=0^\circ$). Это размещение наиболее благоприятно для длинноволновой низкочастотной радиосвязи. Нужно отметить, что входной импеданс $Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}$ в условиях дальней квазистационарной и волновой зон не зависит от влияния токов смещения и ионосферы [9] и отражает только свойства нижнего полупространства.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (13-05-12044-офи-м) и от РАН (проект ОНЗ, № 6). Авторы выражают благодарность доценту СПбГУ к.г.-м.н. А.К. Сараеву за просмотр рукописи и ценные замечания.

Список литературы

1. 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.
2. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 108 с.
3. Ваньян Л.Л.. О роли вертикального и горизонтального скин-эффекта в методе частотного зондирования. // Материалы РАН. Физика Земли. 1996. № 1. С. 45-47.

4. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.
5. Вешев А.В. Электромагнитное профилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.
6. Гасаненко Л.Б. Нормальное поле вертикального гармонического низкочастотного магнитного диполя. // Уч. зап. ЛГУ. 1958. № 249. Вып. 10. С.15-36.
7. Жданов М.С. Электроразведка. // М.: Недра, 1986. 316 с
8. Краев А.П. Основы геоэлектрики. // Л.: Недра, 1965. 587 с
9. Леонтович М.А. Приближенные граничные условия для электромагнитного поля на поверхности хорошо проводящих тел. // В кн.: Исследования по распространению радиоволн. II, Л.: Физматгиз, 1948. С. 5- 12.
10. Сараев А.К., Косткин П.М. Структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. // Вопросы геофизики. Вып. 35. СПб.: Изд. СПбГУ, 1998. С. 117-135 (Ученые записки СПбГУ, № 433).
11. Шевцов А.Н. Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. СПб.: Изд. СПбГУ, 2001. 21 с.
12. 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 КНИЦ РАН, 2006. С. 171-181.
13. Шлыков А.А., Сараев А.К. Волновые эффекты в поле высокочастотного горизонтального электрического диполя // Физика Земли. 2014. № 2. С. 100–113. DOI: 10.7868/S0002333714020100.
14. Bannister, P. R. The determination of representative ionospheric conductivity parameters for ELF propagation in the earth-ionosphere waveguide, Radio Sci., 1985. 20. P. 977-984.
15. Bernstein, S.L., Burrows, M., Evans, J.E., et al. Long_Range Communication at Extremely Low Frequencies. Proc. IEEE, 1974. V. 62. N. 3. P. 292–312.
16. Boerner D.E. (1991). Controlled source electromagnetic deep sounding: theory, results and correlation with natural source results. Invited Review Paper for the 10th Workshop on EM Induction / Ensenada: Mexico. 1991. P. 3-50.
17. Boerner D.E. and West G.F. A generalized representation of electromagnetic fields in a layered Earth // Geophysical Journal of the RAS, DGG and EGS. 1989. V. 97, N3, P. 529-547.
18. Chave A.D. Numerical integration of related Hankel transforms by quadrature and continued fraction expansion: Geophysics. 1971. N. 48. 1686 p.
19. Galejs, J. Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves, Pergamon Press, N.Y. 1972.
20. Wait, J. R., Spies. K. P. Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, NBS Tech. Note 300, 1964.

Глава 2. Экспериментальные исследования

Наблюдения гармонического излучения линий электропередач (PLHR) в ионосфере

В. Е. Корепанов, Д. Ф. Дудкин

Львовский центр Института космических исследований, Львов, Украина, vakor@isr.lviv.ua

Общепризнано, что помимо реакции на воздействие солнечного излучения, ионосфера Земли изменяется и от производственной деятельности человечества. Этот фактор постоянно возрастает, особенно в течение последних десятилетий. Мощные передатчики, электростанции, линии электропередач и промышленные объекты составляют основные источники поступления электромагнитной (ЭМ) энергии на ионосферные высоты. Достаточно давно установлено, что мощные источники и потребители электрической энергии, распределенные по поверхности Земли, вызывают различные ионосферные явления, в частности изменения ЭМ поля и параметров плазмы в ионосфере. Происходит устойчивый рост техногенного воздействия на ионосферу, при этом его возможные последствия в настоящее время не известны. Поэтому очень важно провести статистически достоверное исследование вариаций ионосферных параметров за счет мощных техногенных факторов, прежде всего связанных со значительным увеличением производства ЭМ энергии.

Спутниковый мониторинг ионосферы в соответствующих диапазонах частот (от НЧ до ВЧ) с расширенной наземной поддержкой представляет собой наилучшую возможность для наблюдения за освобождением ЭМ энергии, как в глобальном, так и в локальном масштабах. Только таким образом может быть создан действенный инструмент для изучения антропогенных воздействий и определения их возможного критического уровня.

Вызванные наземными процессами – терригенные - ЭМ эффекты в ионосфере наблюдаются, начиная с первых научных спутников. Несмотря на долгую историю таких исследований, вопросы, связанные с ЭМ загрязнением окружающей среды, изучены недостаточно. ЭМ шумы земного происхождения были обнаружены на спутниках ARIEL-3 и -4 [4], в частности шумовые сигналы очень низкой частоты (ОНЧ), вызванные гармониками излучения линий электропередач и ОНЧ передатчиков [2]. Наблюдения ЭМ излучений на низкоорбитальных спутниках «ИНТЕРКОСМОС-19», КОСМОС-1809, АКТИВНЫЙ и АРЕХ подтвердили существенное увеличение интенсивности высокочастотных ЭМ шумов над населенными районами Европы и Азии, например, [7, 9]. В последней работе исследовано глобальное распределение ЭМ излучения в частотном диапазоне 0.1–15 МГц, регистрируемое прибором SORS-1 на борту спутника КОРОНАС-И, и над Евро-Азиатским континентом было обнаружено усиление уровня сигнала над фоном порядка 20 дБ (рис. 1).

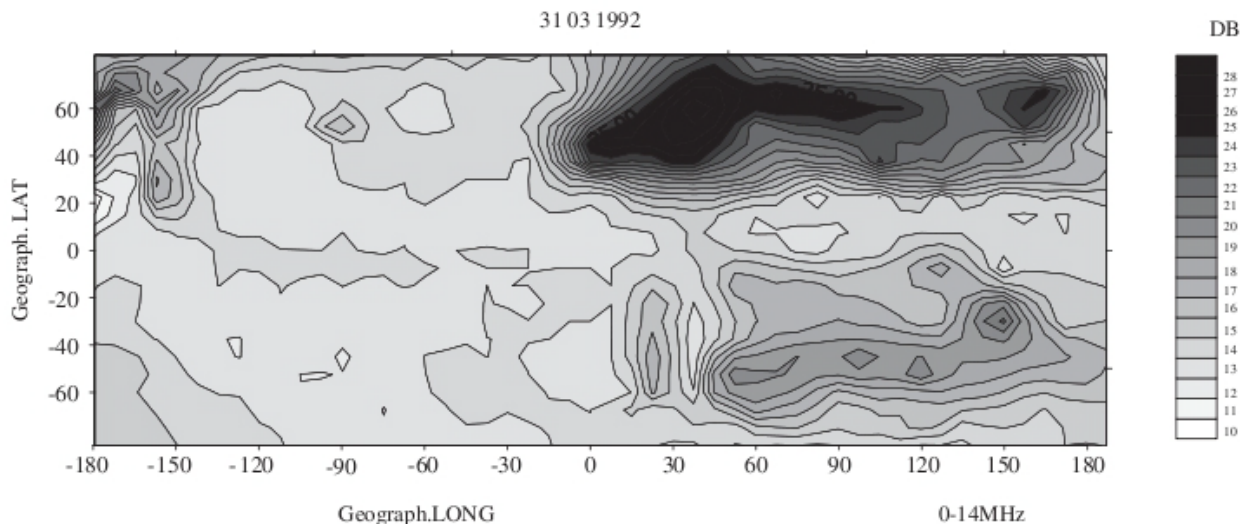


Рис. 1. Глобальное распределение ЭМ излучения в ионосфере в диапазоне частот 0-14 МГц.

Эти наблюдения подтвердили, что околоземное ЭМ окружение достаточно сильно возмущено человеческой деятельностью. Связан с этим и недавно обнаруженный эффект – гармоническое излучение линий электропередач (PLHR) – который, возможно, представляет собой новую угрозу для цивилизации и поэтому должен быть исследован.

Действительно, учитывая, что линии электропередач могут иметь длину до нескольких тысяч километров, они представляют собой антенну соответствующей длины для излучения ЭМ волны 50 или 60 Гц. Излучение возникает следующим образом. Электрический ток обычно подается потребителям по проводам трехфазной электрической линии. Эти провода образуют гигантские петли тока с площадью более нескольких десятков квадратных километров, а амплитуда тока может составлять до 4 кА. Такая электрическая линия образует мощную токовую петлю с очень большим вертикальным магнитным моментом (порядка 10^{11} А*м^2), которая и является источником ЭМ поля 50 или 60 Гц. Токи в линиях электропередач, силовые трансформаторы и промышленное оборудование потребителей всегда содержат и высшие гармоники, и эти последние излучаются с большей эффективностью. Следует подчеркнуть, что нормальное значение коэффициента гармоник в линии электропередачи может находиться в пределах до 6%. Имеются экспериментальные результаты закрытых исследований, которые показывают, что в линиях электропередач могут наблюдаться гармоники 23-го порядка и выше. В результате, потребление электроэнергии действует в двух направлениях: оно изменяет ионосферу и магнитосферу над линией электропередачи и одновременно излучает ОНЧ сигнал основной частоты и ее гармоник в полости Земля - ионосфера.

Рис. 2 иллюстрирует сложность нелинейного взаимодействия различных природных и техногенных факторов [8] и показывает, что влияние излучения линий электропередач может вызвать диссипацию энергичных электронов из радиационных поясов Земли. Физика обнаруженного явления заключается в нелинейном взаимодействии сильных электрических и магнитных полей с ионосферной и магнитосферной плазмой и с заряженными частицами в радиационных поясах Земли. При этом паразитное ЭМ излучение от линий электропередачи проникает в связанную систему ионосфера-магнитосфера и увеличение производства энергии может влиять на популяцию заряженных частиц, изменяя их энергию и питч-угол, что и может привести к их усиленному выпадению из радиационных поясов с неизвестными последствиями для окружающей среды.



Рис. 2. Влияние гармонического излучения линий электропередач на земную среду (взято из [8]). Стрелки соединяют известные физические процессы (без количественной оценки).

Такие эффекты действительно часто наблюдаются с борта спутников при исследованиях ЭМ полей и концентрации заряженных и нейтральных частиц. Возможно, что при дальнейшем развитии исследований могут быть экспериментально установлены и количественные соотношения, что позволит оценить уровни ЭМ загрязнения, создаваемые отдельными потребителями или целыми странами.

Так, известно, что компонента ЭМ поля, которая взаимодействует с плазмой ионосферы прямо над линией электропередачи, нагревает электроны в нижней ионосфере. Соответствующая оценка, сделанная в [10], полагает, что именно нагрев электронов является демаскирующим фактором передатчика ВМС США в Висконсине: расчеты показывают, что увеличение средней температуры электронов ($T_e = 300 \text{ К}$) может достигать 10%, в зависимости от времени суток и положения линии. Такие отклонения могут показаться небольшими, однако следует подчеркнуть, что этот фактор действует постоянно, днем и ночью. В результате совокупный эффект может стать существенным, особенно если рассматривать не одну линию, а, например, региональную систему энергоснабжения, охватывающую большую площадь.

В доказательство возможности мониторинга локального потребления энергии из космоса можно привести пример обнаружения излучения линий электропередач на спутнике «Чибис-М» (запущен 25 января 2012 г., см. [1]), при его пролете над территорией Бразилии (рис. 3). Интересно отметить, что при обработке было обнаружено три момента повышения амплитуды сигнала 60 Гц (рис. 3в), а на карте, взятой из интернета, обнаружено только две высоковольтные линии, которые пересекла траектория спутника. При дальнейшем уточнении оказалось, что между двумя магистральными линиями электропередачи, указанными на карте, существует и локальная линия напряжением 500 кВ; можно допустить, что она и вызвала наблюдаемый третий

пик на рис. 3, в. Это подтверждает, во-первых, что сигналы от линий электропередачи непосредственно проникают на высоты ионосферы (орбита «Чибис-М» почти круговая на высоте 520 км), и, во-вторых, что существует возможность мониторинга локального уровня производства электроэнергии со спутника.

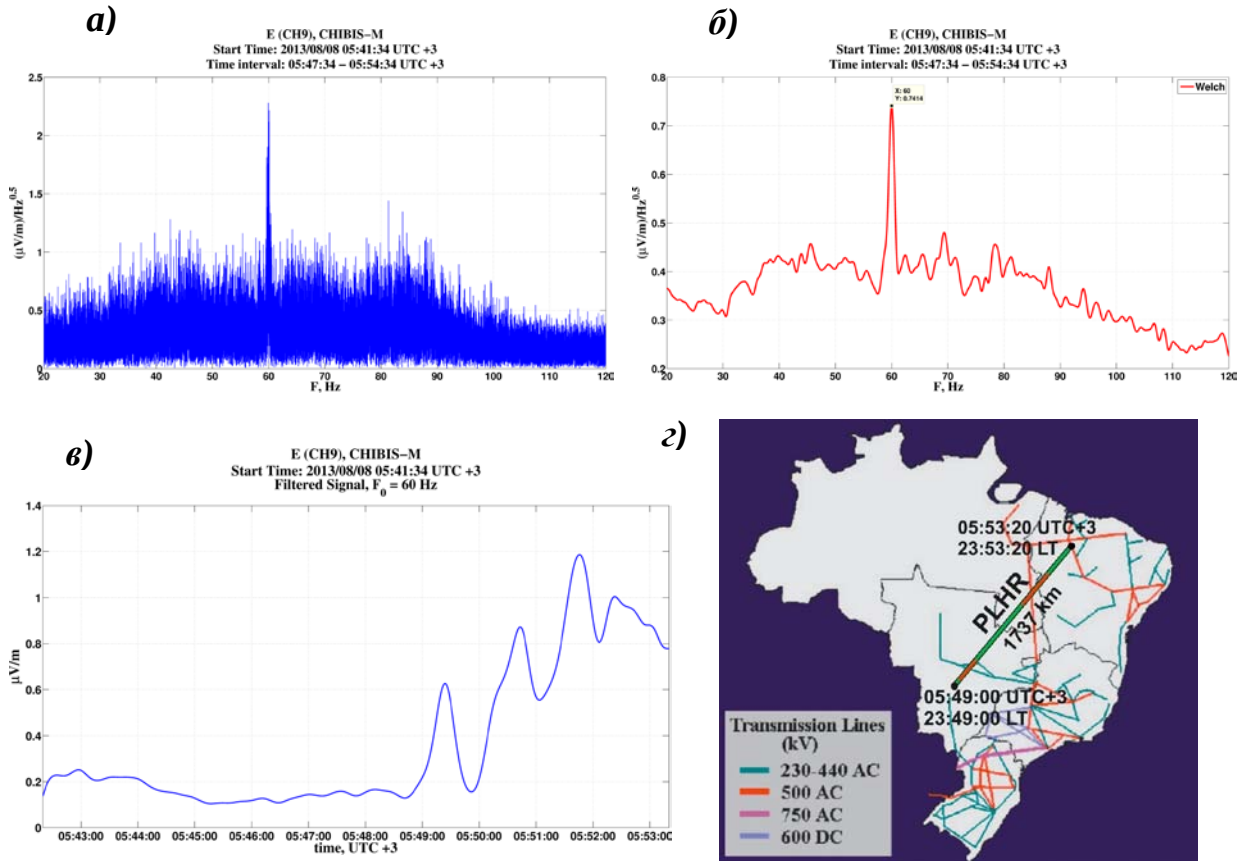


Рис. 3. Данные спутника «Чибис-М», полученные при пролете над территорией Бразилии: а) волновая форма сигнала; б) спектр сигнала; в) изменение амплитуды сигнала 60 Гц при пролете и г) трасса спутника над территорией Бразилии и линии высоковольтных передач (цветом показаны напряжения).

Следует отметить, что локальные ионосферные эффекты от линий электропередач регистрируются не только в космических экспериментах, но и при наземных наблюдениях. Так, в работе [3] убедительно продемонстрировано отражение изменений в режиме работы системы электроснабжения на территории США в районе Новой Англии, полученное с помощью высокочувствительных магнитометров типа «ЛЕМИ» [www.isr.lviv.ua], установленных в магнитосопряженной точке на Украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский» (рис. 4). Хорошо видны локальные эффекты от изменений режима работы системы энергоснабжения, включая снижение потребления в конце недели и особенно выход из строя системы из-за интенсивной магнитной бури 14 августа 2003 года. Это подтверждает, что токи в линиях электропередач генерируют излучения, создающие хорошо заметные нарушения в ионосфере. Физический механизм этого явления исследуется уже достаточно давно, например, [4, 2], но до настоящего времени общепринятого его пояснения нет.

Однако и гармоники промышленной частоты 50 (60) Гц также постоянно наблюдаются с борта спутников, при этом в самых различных диапазонах. Такие регулярные серии в области повышенных частот сопровождаются, как правило, целым спектром, формируемым набором линий, разделенных 50 или 100 Гц. Их амплитуда увеличивается в области 1 - 2 кГц, однако, как показывают экспериментальные данные, они могут наблюдаться и в диапазоне до 15 кГц.

Так, на рис. 5 показаны достаточно мощные гармоники частоты 50 Гц, полученные на борту спутника «Сич-1М» в эксперименте «Вариант» [5] на юге Аравийского полуострова (на высоте ~340 км) в каналах измерения магнитной индукции (рис. 4, а) и плотности пространственного тока (рис. 4, в).

Не менее интересные результаты получены в эксперименте на спутнике «Деметер»: кластеры линий электромагнитного излучения, разнесенных на 50 Гц и центрированных в самых разных диапазонах,

наблюдались в результатах измерений электрической компоненты [6]. Почему такие кластеры наблюдаются центрированными в широком диапазоне частот – от ~ 1.5 кГц до 14.5 кГц, и при этом довольно редко, до сегодняшнего дня убедительного пояснения нет.

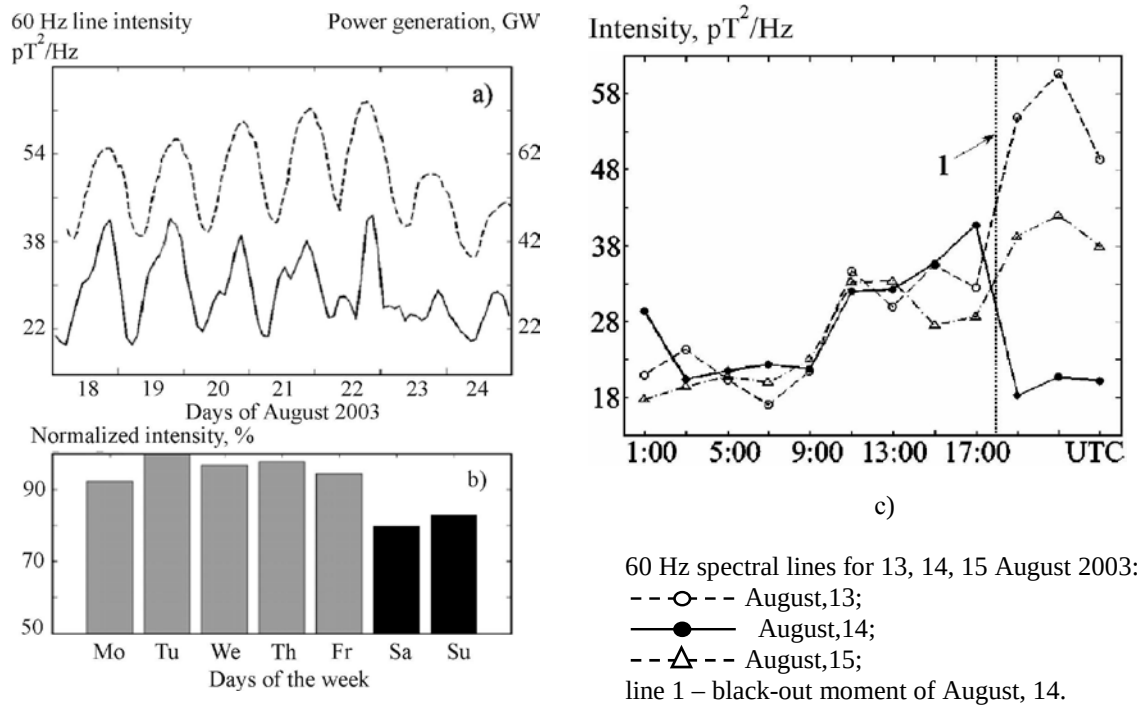


Рис. 4. Ход интенсивности излучения 60 Гц, наблюдаемый на УАС «Академик Вернадский»: а) - сравнение регистрируемого излучения (сплошная линия) с производимым объемом энергии (пунктирная линия); б) - усредненное за год недельное изменение интенсивности излучения с частотой 60 Гц; в) - дневной ход интенсивности линии 60 Гц за три дня, иллюстрирующий масштабное отключение электроэнергии в Новой Англии, США, во время интенсивной магнитной бури 14.08.2003 [3].

Таким образом, имеющаяся информация позволяет с высокой степенью достоверности утверждать, что постоянное наблюдение электромагнитных возмущений в ионосфере со спутника может дать действенный метод объективного мониторинга уровня потребления электроэнергии и его дневных или сезонных изменений и построить карту потребления энергии как в локальном (в пределах одной страны), так и в глобальном масштабах. При дальнейшем развитии метода можно ожидать, что будет создана карта ЭМ загрязнений, создаваемых каждой страной, и даже появится возможность осуществлять контроль над скрытыми потребителями энергии.

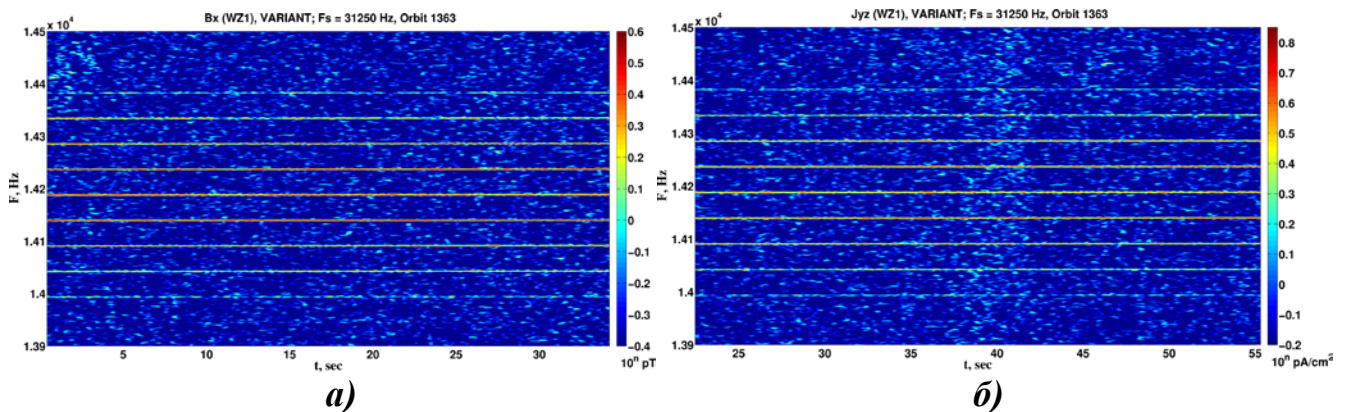


Рис. 5. Гармоники частоты 50 Гц, транспонированные в область 14,2 кГц, наблюдаемые на спутнике «Сич-1М»: а) по магнитному полю, б) по плотности пространственного тока.

Список литературы

1. Зелёный Л.М., Гуревич А.В., Климов С.И., Ангаров В.Н., Батанов О.В., Богомолов А.В., Богомолов В.В., Вавилов Д.И., Владимирова Г.А., Гарипов Г.К., Готлиб В.М., Добриян М.Б., Долгоносков М.С., Ивлев Н.А., Калужный А.В., Каредин В.Н., Карпенко С.О., Козлов В.М., Козлов И.В., Корепанов В.Е., Лизунов А.А., Ледков А.А., Назаров В.Н., Панасюк М.И., Папков А.П., Родин В.Г., Сегеди П., Свертилов С.И., Суханов А.А., Ференц Ч., Эйсмонт Н.А., Яшин И.В. Академический микроспутник ЧИБИС-М. Космические исследования, 2014 том 52, № 1.
2. Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука, 1985. 224 с.
3. Колосков А.В., Ямпольский Ю.М. Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике. Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14. № 4, С. 367-376.
4. Bullough K., Kaiser R. Strangeways, H.J. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere. - Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. V. 47. Dec. 1985. P. 1211-1223.
5. Dudkin, F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARIANT – first results from wave probe. - Adv. Space Res. 2009. V. 43. N. 12. P. 1904-1909.
6. Nemec F., Santolic O., Parrot M., Bortnik J. Power line harmonic radiation observed by satellite: Properties and propagation through the ionosphere, Journal of Geophysical Research. 2008. V. 113, A08317.
7. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. - Annales Geophysicae. Feb. 1990. V. 8. P. 135-145.
8. Parrot, M., Zaslavski, Y. Physical mechanisms of manmade influences on the magnetosphere. - Surveys in Geophysics. 1996. V. 17. N. 1. P. 67-100.
9. Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. - Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. V. 67, issue 8-9. P. 821-828.
10. Row, R. V., Mentzoni, M. H On D-region Electron Heating by a Low-Frequency Terrestrial Line Current With Ground Return. Radio Science. 1972. V. 7, issue 11. P. 1061–1066.

Результаты экспериментальных исследований взаимодействия СНЧ-радиоволн с земной корой на востоке России

Ю.Б. Баикуев, В.Б. Хантанов

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, buddich@mail.ru

В работе приведены результаты радиоимпедансных зондирований в дальней зоне СНЧ-радиоустановки «Зевс» на расстоянии около 4000 км.

Экспериментальные исследования взаимодействия СНЧ-радиоволн с земной корой на востоке России проводились с целью поиска участка земной коры размерами не менее 100 км х 100 км с очень низкой электропроводимостью $\sigma = 10^{-4} - 10^{-5}$ См/м. На первом этапе работ (1980-1982 г.г.) была создана «Прогнозная карта эффективного сопротивления земной коры юга Сибири и Дальнего Востока» масштаба 1:2500000 на площадь 1,73 млн. км² (рис.1). Карта основана на фондовых геофизических материалах Иркутского, Бурятского, Читинского, Якутского, Хабаровского, Приморского геологических управлений и составлена по данным 198 фондовых отчетов и 27 публикаций.

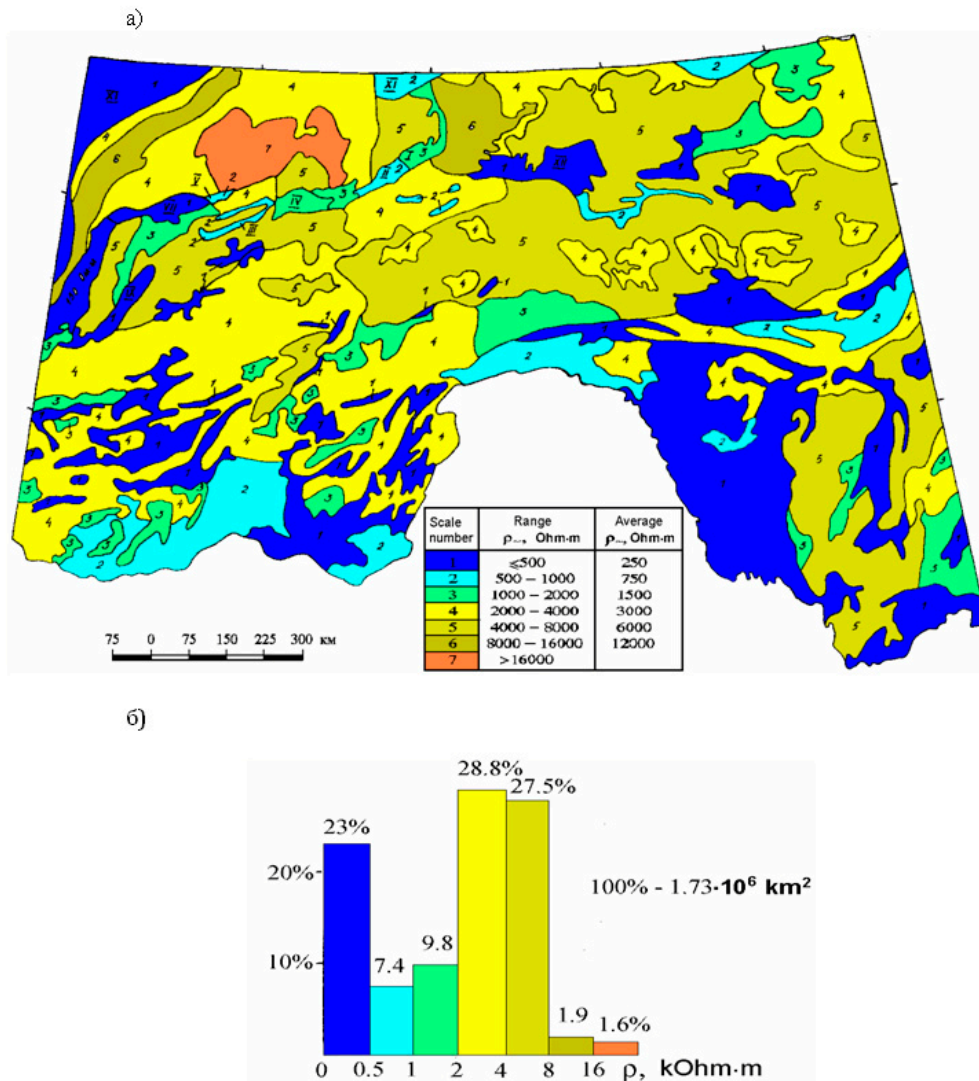


Рис. 1. а) Прогнозная карта эффективного сопротивления Юга Сибири и Дальнего Востока для частоты 40 Гц. Масштаб 1:2500000; б) Диаграмма площадного распределения эффективного сопротивления территории по шкале ρ на прогнозной карте Юга Сибири и Дальнего Востока.

Одновременно отрабатывалась методика и техника СНЧ-зондирований с использованием поля установки «Зевс» и проводились аэросъемочные работы в СДВ диапазоне радиоволн на перспективных участках (рис.2). Результаты этих исследований содержатся в [2-4, 6, 7, 10, 14, 15].

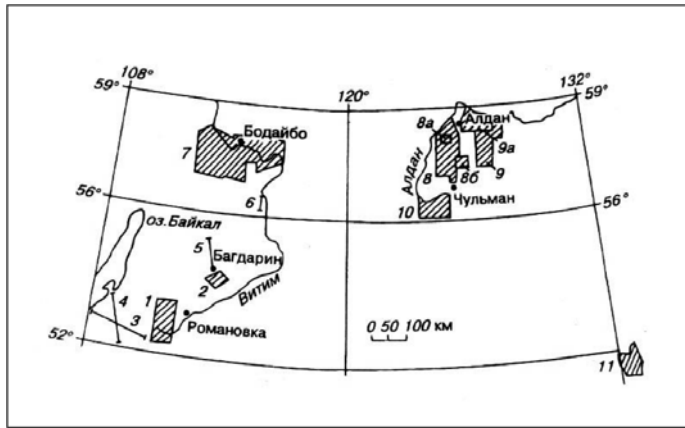


Рис. 2. Схема наземных СНЧ исследований и аэросъемочных работ на самолете АН-2:

1-6 - Бурятия (1 - участок Сосновский, 2 участок Багдаринский, 3 - профиль Поперечное - Турка, 4 - профиль Усть-Баргузин - Хоринск, 5 - профиль оз. Баунт - Багдарин, 6 - профиль Муйская долина); 7 - Иркутская область (участок Конкудеро-Мамаканский); 8-10 - Саха-Якутия (участки: 8 - Центральный Алдан, 8а - Нимгерканский, 8б - Канкунский, 9 - Восточный Алдан, 9а - Эльконкский, 10 - Становой); 11 - Хабаровский край (участок Ниманский)

В работах [2, 4, 5, 6] предложен и обоснован метод измерения комплексной величины поверхностного импеданса земной коры в СНЧ-диапазоне. Аппаратура основана на принципе синхронного детектирования слабых сигналов и реализована в виде чувствительного СНЧ-импедансметра для определения амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля. В качестве зондирующего поля использовалось радиоволновое излучение горизонтальной заземленной линейной электрической антенны, питаемой высокостабильным синусоидальным током с частотой от 33 до 188 Гц. Поле СНЧ-излучателя характеризуется малым ослаблением при распространении в волноводе «Земля-ионосфера» (порядка 1 дБ на 1000 км на частотах около 100 Гц), что дает возможность проводить измерения импеданса в широком диапазоне расстояний от излучателя ($500 < R < 20000$ км). СНЧ-радиоустановка [8, 9, 11] состояла из генератора синусоидального тока и горизонтально ориентированной и заземленной на концах антенны длиной около 60 км. Величина тока в антенне 200-300 А.

Для измерения поверхностного импеданса $\delta = E_{\tau} / (H_{\tau} \cdot Z_0)$ разработано двухканальное устройство для одно-временного приема и регистрации горизонтальных электрической E_{τ} и магнитной H_{τ} компонент поля [5]. Для выделения полезного сигнала при малых соотношениях сигнал/шум использован принцип синхронного детектирования. Пороговая чувствительность каналов составляла $2 \cdot 10^{-8}$ А/м по H_{τ} и $5 \cdot 10^{-9}$ В/м по E_{τ} . В качестве усилителя и синхронного детектора с ФНЧ использовался фазочувствительный нановольтметр «Unipan 232В».

Погрешность измерения в различных условиях составляла в среднем по модулю импеданса - 4%, по фазе импеданса - $(2-5)^{\circ}$. Уровни принимаемого поля составляли по $H_{\tau} = (1 \div 4) \cdot 10^{-7}$ А/м, по $E_{\tau} = 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-7}$ В/м и были соизмеримы с уровнем ЕЭМПЗ. Измерения проводились в модификациях зондирования и профилирования. Затраты времени на измерения на одной частоте составляли 1÷1,5 ч, на четырех частотах - 4÷5 ч. Полевые испытания показали, что мобильный СНЧ-импедансметр позволяет проводить измерения в самых различных погодных условиях (ближние грозы, дождь, ветер, снег, мороз до -25°C). Он определяет также абсолютные уровни напряженности поля E_{τ} и H_{τ} и пеленг на источник поля, что позволило использовать его для исследования условий распространения СНЧ радиоволн. СНЧ-импедансметр использован для диагностики электрического состояния и структуры земной коры до глубин 10-20 км. Регулярные данные о вариациях взаимно перпендикулярных E_{τ} и H_{τ} составляющих поля получены в 17 полусуточных сеансах (204 ч записей). Установлено, что синхронно зарегистрированное отношение горизонтальных взаимно-перпендикулярных компонент электрического E_{τ} и магнитного H_{τ} полей на границе раздела (поверхностный импеданс) с точностью до погрешности эксперимента сохраняется постоянным при значительных (до 3 раз) и немонотонных вариациях уровня поля. На основе экспериментов сделан вывод о независимости измеренных значений импеданса δ (в пределах погрешности измерений) от значительных и немонотонных вариаций уровня зондирующего поля. С методической точки зрения это следующее из теории свойство импеданса позволяет проводить его измерения в любое время суток. Примеры вариаций уровней E_{τ} и H_{τ} представлены на рис.3.

Для объяснения вариаций СНЧ поля выполнены расчеты распространения СНЧ радиоволн для модели неоднородного волновода «Земля-ионосфера» [6]. На рис. 4 представлены результаты сравнения измерений H_{τ} и её расчетов для электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в волноводе «Земля – ионосфера» с учетом нерегулярности «день – ночь». Сравнение расчетных и измеренных значений H_{τ} показывает их неплохое соответствие. Расхождения расчетных и измеренных уровней поля могут быть обусловлены расположением излучателя за Полярным кругом, где летом «полярный день».

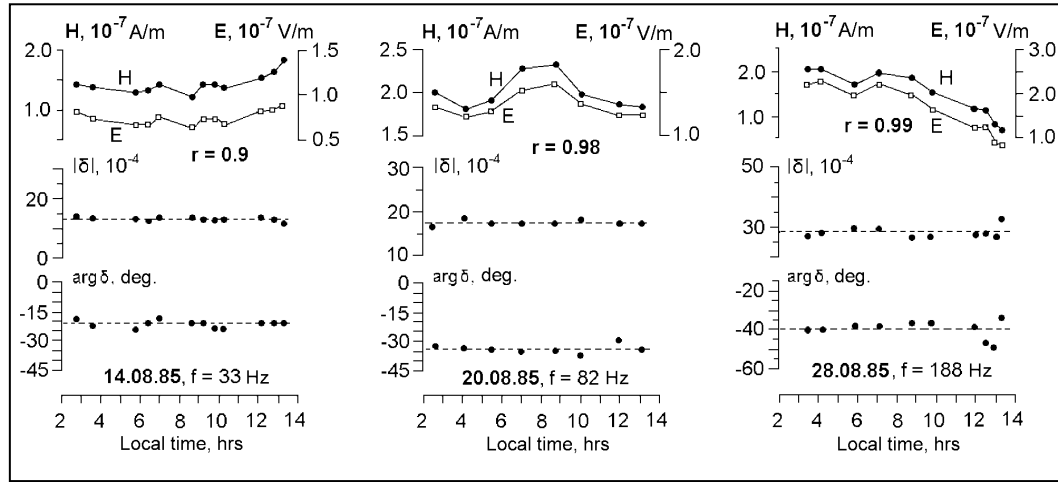


Рис. 3. Вариации уровня E , H , $|\delta|$ и $\varphi_\delta = \arg \delta$.

Измерения импеданса в СНЧ-диапазоне выполнены в 92 пунктах наблюдений, расположенных на различных комплексах горных пород. Всего проведено 475 определений модуля и фазы поверхностного импеданса, включая режимные и методические наблюдения на ряде пунктов. Первое зондирование проведено в п.н. «Мыс Повалишина» в 1980 г. Начиная с 1983 г. отряд ИФМ СО РАН проводил зондирования в районах Сибири с разным геолого-тектоническим строением. Цель исследований - выявление районов с высоким эффективным сопротивлением земной коры в областях выхода на поверхность древних пород на востоке России.

Первые площадные измерения в СНЧ диапазоне выполнены на участке «Удинский» в районе среднего течения р. Уды в 5 пунктах на частотах 44 и 82 Гц с использованием радиополя установки «Зевс» [5]. Схема расположения пунктов наблюдений приведена на рис. 5. Результаты измерений модуля поверхностного импеданса $|\delta|$, фазы φ_δ и эффективного сопротивления $\rho_\sim$ представлены в табл. 1.

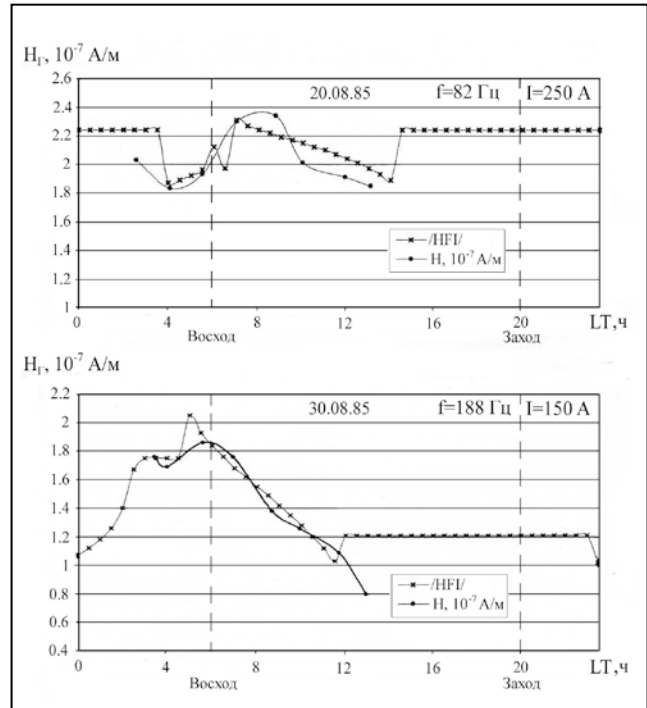


Рис. 4. Результаты сравнения расчетных и измеренных значений магнитной компоненты поля H_z для модели неоднородного волновода «Земля-ионосфера».

Таблица 1.

Пункт наблюдения	44 Гц			82 Гц		
	$ \delta \cdot 10^{-3}$	φ_δ , град	$\rho_\sim$, кОм.м	$ \delta \cdot 10^{-3}$	φ_δ , град	$\rho_\sim$, кОм.м
п.н. 1 Поповское	-	-	-	8,4	-38	15,9
п.н. 11 т. 317	4,9	-22	14,2	5,4	-20	10,1
п.н. 12 Колчеданный	6,2	-8	58	6,1	-11	22
п.н. 14 Кыргында	1,6	-5	6	1,9	-7	3,4
п.н. 15 Тулдун	0,42	-19	0,11	0,61	-34	0,09

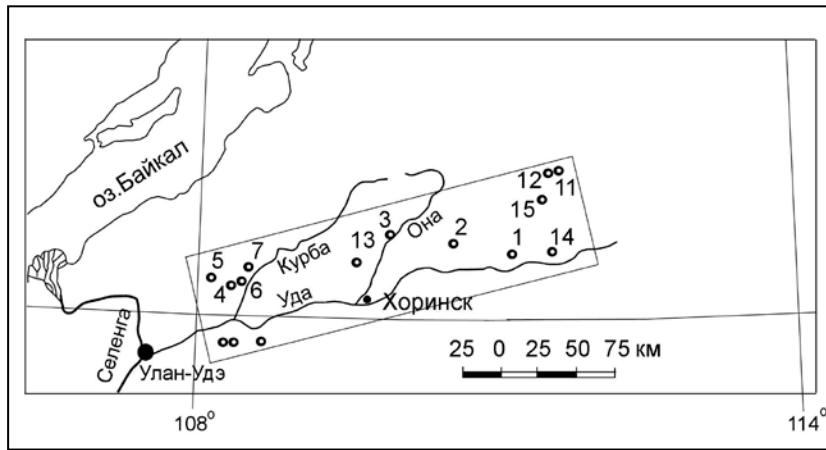


Рис. 5. Схема расположения пунктов наблюдений в СНЧ диапазоне. Участок «Удинский».

Для зондирования в СНЧ-диапазоне выбирались изученные азоровариантом метода РЭМП в СДВ-диапазоне участки фундамента, сложенные гранитами. При интерпретации для повышения надежности и устойчивости решения использованы также данные СДВ измерений импеданса на частотах 17 - 50 кГц. Результаты интерпретации в рамках 5-слойной модели для 6 пунктов зондирования приведены на рис. 6 и в табл. 2.

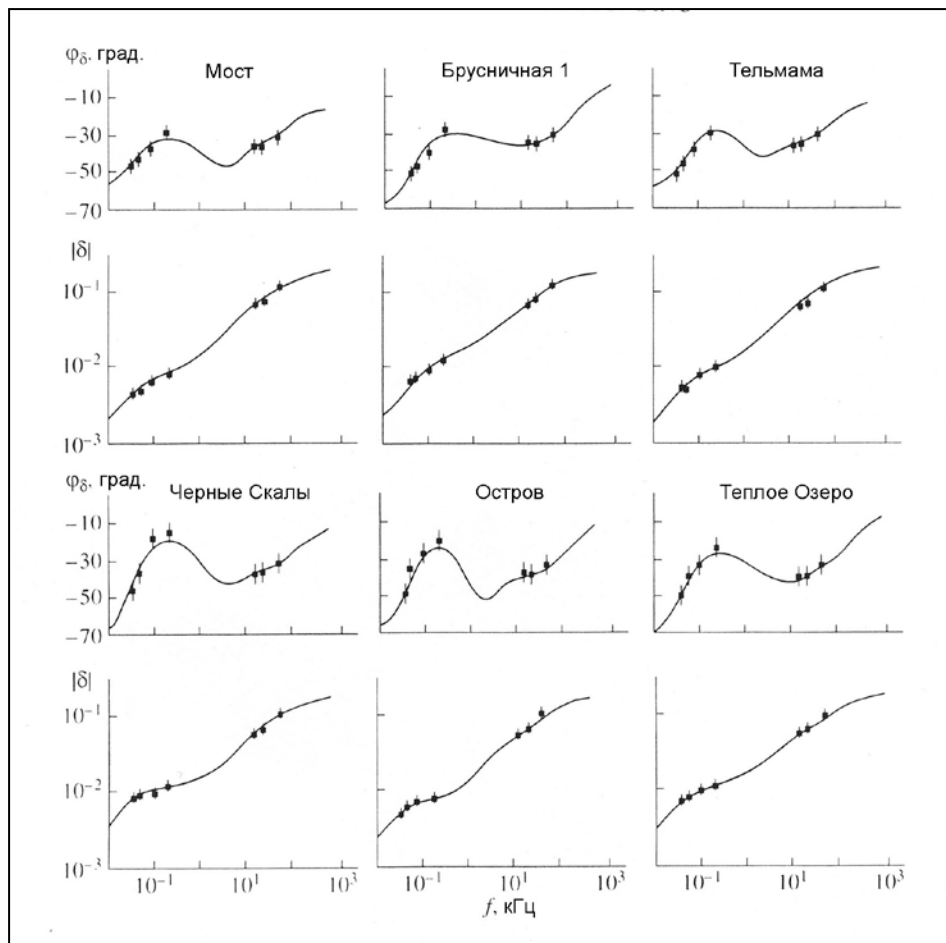


Рис. 6. Частотные зависимости радиоимпедансных зондирования на Конкудеро-Мамаканском гранитоидном массиве

Таблица 2

Результаты интерпретации на Конкудеро-Мамаканском гранитоидном массиве.

Пункты наблюдения	Параметры разреза: ρ_j , Ом·м; h_j , м									
	ρ_1	h_1	ρ_2	h_2	ρ_3	h_3	ρ_4	h_4	ρ_5	h_5
Мост Тельмама	1200	10	6000	290	3000	480	15000	7000	2000	∞
Брусничная-1	400	3	6000	350	8600	580	24000	9400	600	∞
Тельмама	1200	8	6200	870	1800	130	34000	6300	2000	∞
Черные Скалы	1200	8	6100	850	1900	75	129000	17400	270	∞
Остров	800	4	5300	670	550	110	130000	9900	320	∞
Теплое Озеро	400	2	6100	350	7400	600	41600	13600	350	∞

Теоретические кривые $|\delta|$ и φ_δ , соответствующие интерпретируемым разрезам хорошо совпадают с амплитудно-фазовыми экспериментальными данными. Поведение фазовых кривых φ_δ на частотах 33 и 44 Гц в пределах гранитоидного массива подтверждает существование проводящего слоя на глубине 7 - 17 км и хорошо согласуется с результатами расчетов для модели коры, имеющей коровый проводящий слой. Верхняя часть гранитоидного массива толщиной до 1 - 2 км обладает относительно низким сопротивлением, обычно это зона трещиноватых и увлажненных гранитов. Сопротивление высокоомного гранитного слоя имеет значения $\rho=15000\div 200000$ Ом·м. Фазовые данные СНЧ-СДВ - диапазонов подтверждают такую модель глубинного строения гранитоидного массива.

Постановка СНЧ-зондирований в диапазоне 33÷188 Гц на гранитоидном массиве позволила выявить на глубинах 7—17 км понижение сопротивления земной коры до 270 - 2000 Ом·м. На примере гранитоидного массива установлено, что случайная величина поверхностного импеданса δ соответствует двумерному логнормальному закону распределения, при этом фаза импеданса подчиняется нормальному закону. По результатам наземных СНЧ зондирований и СДВ профилирования аэровариантом метода РЭМП построена прогнозная карта эффективного сопротивления Конкудеро-Мамаканского нагорья для частоты 80 Гц масштаба 1:200000 (рис. 7).

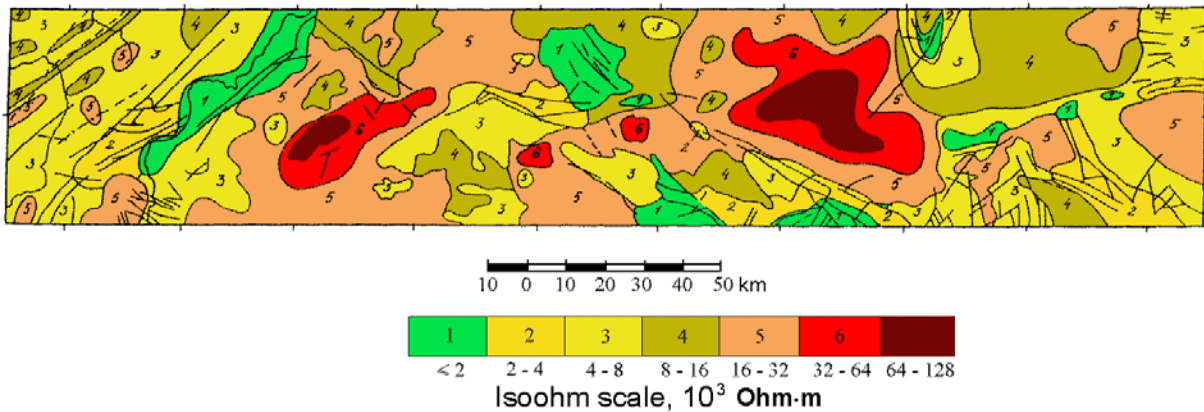


Рис.7. Прогнозная карта эффективного сопротивления Конкудеро-Мамаканского нагорья для частоты 80 Гц масштаба 1:200000.

Результаты измерений эффективного сопротивления земной коры на частоте 82 Гц на профиле 1 Конкудеро-Мамаканского нагорья представлены на рис. 8. Результаты определения $\rho_{\sim}$ в СНЧ- и СДВ-диапазонах позволяют определить коэффициент $K = \rho_{\text{снч}}/\rho_{\text{сдв}}$. В условиях неоднородной в пределах кристаллического массива земной коры K изменяется в широких пределах, достигающих в зонах тектонических нарушений 0,055 и 18,2. Для гранитоидных массивов обычно $\rho_{\text{снч}} > \rho_{\text{сдв}}$, при этом значения K изменяются в пределах 1,2÷8,4, а среднее значение по статистическим данным составляет $\bar{K} = 23600/4200 = 5,6$.

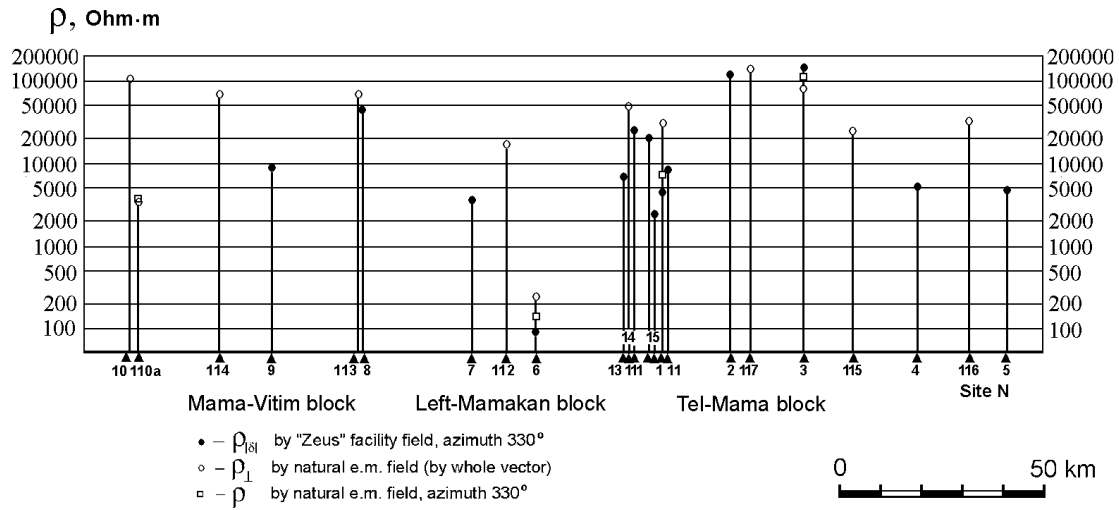


Рис. 8. Эффективное сопротивление земной коры на частоте 82 Гц на профиле 1 Конкудеро-Мамаканского нагорья (с использованием поля установки «Зевс» и естественного электромагнитного поля Земли).

Результаты одновременных измерений в пунктах наблюдения 38 и 39 Конкудеро-Мамаканского нагорья на частотах 82 Гц и 22,3 кГц (табл. 3) позволяют сделать вывод о том, что сопротивление монолитной гранитоидной толщи (глубины от 0,5 до 10 км) выше сопротивления приповерхностной части разреза (0—0,5 км) и обобщенный геоэлектрический разрез (ГЭР) представляется в виде $\rho_1 < \rho_2 \dots < \rho_n > \rho_{n+1}$.

Таблица 3

Пункт наблюдения	δ	φ_δ , град.	$\rho_\sim$, кОм·м	K
38	СНЧ $13,9 \cdot 10^{-3} \pm 2 \%$	-40 ± 3	42	3,1
	СДВ $115 \cdot 10^{-3} \pm 26 \%$	-36 ± 3	13,7	
39	СНЧ $18,2 \cdot 10^{-3} \pm 7 \%$	-35 ± 3	73	3,5
	СДВ $141 \cdot 10^{-3} \pm 7 \%$	-35 ± 3	20,6	

Кроме того, карты эффективного сопротивления, полученные в СДВ-диапазоне по данным аэроварианта метода РЭМП, дают возможность выбирать в пределах гранитоидных массивов участки с высоким сопротивлением. При использовании таких карт можно утверждать, что сопротивление земной коры в СНЧ-диапазоне будет не ниже представленных на карте. Оперативность картирования аэровариантом метода РЭМП в СДВ-диапазоне позволяет существенно сократить сроки и затраты на проведение поисковых работ при выборе участков с заданными электрическими характеристиками. Результаты аэросъемки позволили обосновать новый критерий прогноза эффективного сопротивления монолитной гранитоидной толщи в СНЧ-диапазоне по величине коэффициента $K = \rho_{\text{СНЧ}} / \rho_{\text{СДВ}} > 1$ и картам $\rho_\sim$ в СДВ-диапазоне. В пределах гранитоидного массива выявлены и закартированы участки пониженного сопротивления, перспективные для размещения протяженных линейных и площадных заземлителей.

Таким образом, с помощью наземных и дистанционных (с борта самолета) методов СНЧ- радиоимпедансного зондирования и СДВ-профилирования выполнен комплекс всесторонних исследований электрических свойств слоистой подстилающей среды в низкочастотной (СНЧ-СДВ) области радиодиапазона [2,10]. Установлены общие и региональные закономерности пространственно-временного и частотного изменения геоэлектрических характеристик, выделены и классифицированы основные типы геоэлектрических структур на глубину скин-слоя. Получен большой массив данных для банка электрических свойств земной коры и земных покровов (вода, лед). Установлено, что многопараметрическая интегральная электродинамическая характеристика слоистой природной толщи — поверхностный импеданс однотипного комплекса горных пород — соответствует логнормальному закону распределения для $|\delta|$, $\text{Re} \delta$, $\text{Im} \delta$ и нормальному — для φ_δ . Показано, что действие различных природных факторов и изменение частоты приводят к изменению параметров статистических моделей с сохранением закона распределения [2]. Разработан метод физико-статистического прогноза геоэлектрического разреза основных типов слоистой подстилающей среды, учитывающий протекающие в ней физические процессы различного пространственно-временного масштаба. Обоснована и детально отработана методология мелко- и крупномасштабного геоэлектрического картирования. По результатам площадной СДВ-аэросъемки и наземных СНЧ-измерений предложен и обоснован новый критерий прогноза эффективного сопротивления гранитоидной толщи в СНЧ-диапазоне.

Цель исследований достигнута — на востоке России найден участок земной коры заданных размеров с очень низкой в СНЧ диапазоне радиоволн электропроводимостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 12-02-98002 и № 12-02-98007.

Список литературы

1. Ангархаева Л.Х., Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П. Обратная задача для слоистой импедансной среды // Радиотехника и электроника. 1997. Т.42. №10. С. 1169-1173.
2. Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 207с.
3. Башкуев Ю.Б., Буянова Д.Г. Электрические свойства горных пород Алдано-Станового нагорья по данным сверхдлинноволнового радиоимпедансного зондирования с борта самолета // Горный информационно-аналитический бюллетень. М. 2011. № 1. С. 191-197.
4. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Глубинное радиоимпедансное зондирование земной коры с использованием электромагнитного поля СНЧ радиоустановок // Физика Земли. № 2, 2001. С. 157-165.
5. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Способ и устройство для измерения поверхностного импеданса земной коры в сверхнизкочастотном диапазоне радиоволн. Авторское свидетельство № 299005, 01.08.1989 г., заявка 3198692/28, 10.05.1988, опубликовано 27.12.2009. Изобретения. Полезные модели. № 36. SU 1840791 A1.
6. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Ханхараев А.В. Анализ условий распространения СНЧ радиоволн на трассе «Зевс»- Забайкалье // Известия вузов. Радиофизика. Т.XLVI. № 12. 2003. С. 1017-1026.
7. Буянова Д.Г., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Адвокатов В.Р. Электромагнитная диагностика горных пород Витимского плоскогорья и Буреинского массива в СНЧ-ОНЧ диапазонах радиоволн // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета, спец. выпуск 5(51). Красноярск. 2013. С. 179-182.
8. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона. ДАН. 1994. Т. 338. № 1. С. 106-109.
9. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н. и др. Глубинные электромагнитные исследования с применением мощных сверхнизкочастотных радиоустановок. // Физика Земли. 1998. № 8. С. 3-22.
10. Мельчинов В.П., Башкуев Ю.Б., Ангархаева Л.Х., Буянова Д.Г. Электрические свойства криолитозоны востока России в радиодиапазоне. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 257 с.
11. Сараев А.К., Собчаков Л.И., Васильев А.В. и др. Перспективы использования СНЧ радиоустановки для решения геолого-геофизических задач / Тезисы докладов Междунар. Конф. «Закономерности эволюции земной коры». СПб. 1996. Т. 1. С. 271.
12. Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Э.Л. Афраймович [и др.]; отв. ред. Г.А. Жеребцов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т солнечно-земной физики [и др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 304 с.
13. Bashkuev Yu.B., Buyanova D.G., M.G. Dembelov M.G., Khaptanov V.B., Naguslaeva I.B., V.R. Advokatov V.R. Influence of Electric Characteristics of Inhomogeneous Lithosphere on Excitation and Propagation of Seismogenic Electromagnetic Emissions // Universal Journal of Geoscience. 2013. V. 1. N. 2. P. 56-64.
14. Bashkuev Yu.B. and Khaptanov V.B. Results on «Zeus» station application for electromagnetic sounding of seismoactive area // Seismoelectromagnetics, eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. TERRAPUB, Tokyo. 2002. P. 239-247.
15. Bashkuev Yu.B., Melchinov V.P., Dembelov M.G., Angarkhaeva L.Kh., Buyanova. The Electrical Properties of the Cryolithic Zone of the North-East Asia on the Radioimpedance Soundings Data in the VLF-LF-MF Bands // Universal Journal of Geoscience. 2013. V. 1. N. 1. P. 20-27.

Опыт совместной интерпретации СНЧ сигналов источника «Зевс» и АМТ-МТЗ для изучения строения земной коры

М.С. Петрищев

СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, e-mail: ms_petr@mail.ru

Анотация

Представлен опыт решения обратной задачи данных электромагнитных зондирований в поле естественных и контролируемого источников по материалам 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. В качестве контролируемого источника использована антенна сверхнизкочастотного излучения «Зевс», расположенная на Кольском полуострове на расстоянии более 2000 км от пунктов регистрации сигналов. Регистрация вариаций электромагнитного поля осуществлена в АМТ-МТ диапазоне. Зондирования выполнены в близости от сверхглубокой скважины СГ-7, по стволу которой известны данные электрического каротажа.

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). Это выполнено для уменьшения неопределенности решения обратной задачи, поскольку функция отклика является функционалом проводимости.

Интерпретация данных эксперимента НУР-2011 выполнена по материалам АМТ-МТ зондирования и сравнена с откликами антенны «Зевс» и данными каротажа в стволе скважины. Обратная задача решена путем инверсии Оккам, где больший вес придается фазе функции отклика. При этом автоматически осуществляется привязка к проводимости мантии и, как следствие, больший вес придается кажущемуся сопротивлению на длинных периодах. Кривая геоэлектрического разреза в верхней части разреза хорошо согласуется с данными каротажа, но смещена в сторону более высоких значений. В интервале глубин 6-8 км данные несколько расходятся: 5-20 Ом·м по каротажу и 150-200 Ом·м по решению обратной задачи. Отклики источника «Зевс» расположены чуть ниже кривой кажущегося сопротивления по результатам решения обратной задачи.

При интерпретации материалов НУР-2012 выполнено методическое усовершенствование – на коротких периодах значительный вес придан откликам источника «Зевс». Это сделано согласно тому, что положение и конфигурация контролируемого источника известны точно, что дает известные преимущества. Такая привязка к высокочастотным и низкочастотным ветвям функции отклика привела к более близкому согласию с каротажем сопротивления по всему интервалу глубин бурения.

Задача совместной интерпретации сигналов от искусственного и естественных источников для целей зондирования Земли имеет свои особенности. Традиционно изучение строения земной коры по откликам от естественных источников проводится методом магнитотеллурического (МТ) зондирования, в основе положений которого лежит использование модели плоской волны. Следовательно, интерпретация зондирования в поле контролируемого источника должна выполняться в дальней волновой зоне, чтобы измеряемый поверхностный импеданс совпадал с импедансом плоской вертикально падающей волны, который зависит только от строения и свойств нижележащего полупространства и для которого разработаны методы интерпретации.

Следующая особенность состоит в совмещении МТ откликов и от контролируемого источника в одном и том же направлении (либо двух в случае определения характеристик в направлениях поляризации поля). Любые другие совмещения некорректны, поскольку обратная задача будет решаться для определения характеристик среды в разных направлениях.

Третья особенность связана с учетом эффекта статического смещения кривой кажущегося сопротивления по шкале модуля вверх или вниз в зависимости от характера аномалии подстилающего полупространства. Этот эффект носит название статик-шифта. Эффект может быть компенсирован при решении обратной задачи по методу ОССАМ, когда решение осуществляется с привязкой на проводимость мантии по фазе кажущегося сопротивления. Дополнительно такой способ решения позволяет снизить неопределенность решения обратной задачи, поскольку частотный интервал откликов получается достаточно широким. В этом случае проще находить решение функционала отклика [4]. Для МТЗ инструментом расширения кривых зондирования в сторону длинных периодов является добавление откликов магнитовариационного зондирования (МВЗ), что и является привязкой к проводимости мантии.

В то же время применение контролируемого источника позволяет достаточно быстро и надежно получить отклики для определенного интервала периодов. Надежность достигается за счет того, что положение и конфигурация контролируемого источника задаются наперед. Интервал периодов выбирается заранее для анализа требуемых глубин. Кроме того, с помощью контролируемого источника можно восполнить частотные диапазоны, в которых набор естественных вариаций электромагнитного поля может быть пропущен во время наблюдения. Указанные преимущества зондирования на контролируемом источнике с учетом описанного выше позволяют расширить диапазон зондирования и оценить статик-шифт, что, безусловно, ведет к повышению эффективности зондирования.

Эта методика была успешно опробована на материалах 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 [2, 3]. В качестве контролируемого источника использована антенна сверхнизкочастотного излучения «Зевс», которая представляет собой высоковольтную заземленную линию длиной 55 км [1]. Линия ориентирована в широтном направлении (Запад-Восток) и расположена на территории Мурманского гранитного блока (Кольский п-ов) на удалении 2200 км от района наблюдений. Источник «Зевс» работал на 5 частотах АМТ-МТ диапазона - 188, 144, 82, 62 и 44 Гц. Зондирования выполнены в 2011 г. и повторно в 2012 году в близости от сверхглубокой скважины СГ-7, по стволу которой известны данные электрического каротажа.

Полученные в экспериментах данные зондирований в обоих случаях дополнены откликами глубинного магнитовариационного зондирования на длинных периодах (3 часа – 11 лет) по данным ближайшей геофизической обсерватории «Ключи» (г. Новосибирск, международный код NVS).

Интерпретация данных эксперимента НУР-2011 выполнена по материалам АМТ-МТ зондирований и сравнена с откликами антенны «Зевс» и данными каротажа в стволе скважины [2]. Кривая геоэлектрического разреза в верхней части разреза хорошо согласуется с данными каротажа, но смещена в сторону более высоких значений. В интервале глубин 6-8 км данные несколько расходятся: 5-20 Ом·м по каротажу и 150-200 Ом·м по решению обратной задачи. Отклики источника «Зевс» расположены чуть ниже кривой кажущегося сопротивления по результатам решения обратной задачи.

При интерпретации материалов эксперимента НУР-2012 [3] отклики контролируемого источника были учтены при решении обратной задачи по методике, описанной выше. Такая привязка к высокочастотным (контролируемый источник) и низкочастотным ветвям (МВЗ) функции отклика привела к более близкому согласию с каротажем сопротивления по всему интервалу глубин бурения (рис. 1).

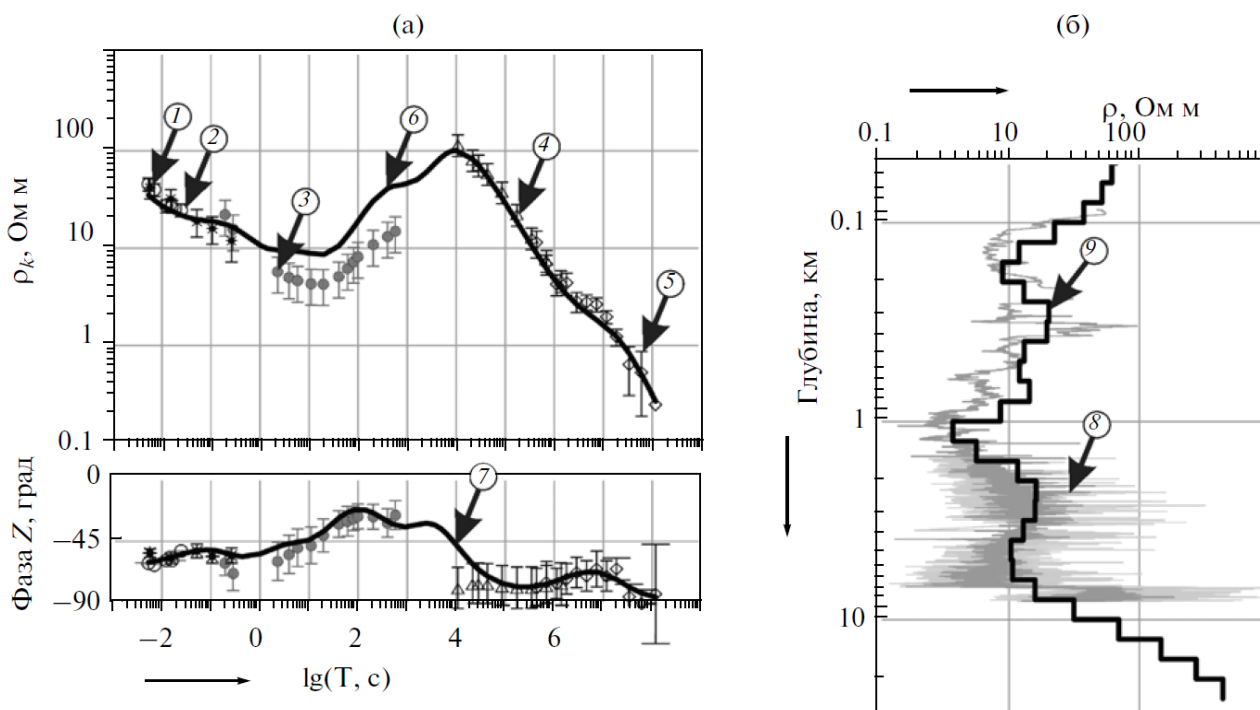


Рис. 1. Результаты эксперимента “НУР_2012” по глубинному зондированию с портативным генератором “Энергия_3” и промышленной ЛЭП “Уренгой_Пангоды” (1) в комплексе с источником “Зевс” (2) и с АМТ-МТЗ (3) и ГМВЗ (4, 5). Левая диаграмма (а) – кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса; правая диаграмма (б) – электрические разрезы по данным каротажа (8) и по результатам зондирования (9); 4 – кривая ГМВЗ, Новосибирск; 5 – региональные данные МВЗ; 6 – результат решения обратной задачи зондирования 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 зондирований с естественными источниками (МТ-АМТ-ГМВЗ) и зондирования с контролируемыми источниками (СНЧ-антенна “Зевс” и портативный генератор “Энергия-3” с промышленной ЛЭП “Уренгой-Пангоды”). [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (11-05-12033-офи-м) и гранта РФФИ (13-05-12044-офи-м) и от РАН.

Список литературы

1. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ_диапазона // Докл. РАН. 1994. Т. 338. № 1. С. 106–109.
2. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н. и др. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин СГ-6 и СГ-7 в полях естественных и мощных контролируемых источников // ДАН. 2012. Т. 445. № 2. С. 205 – 209.
3. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н. и др. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников // Физика Земли. 2013. № 6. С. 99 – 115.
4. Berdichevsky M.N., Zhdanov M.S. (1984) Advanced theory of deep geomagnetic sounding. Elseiver, Amsterdam. 408 p.

Глубинные радиоимпедансные зондирования земной коры с использованием электромагнитного поля СНЧ радиоустановки

Ю.Б. Баикуев, В.Б. Хантанов

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, e-mail: buddich@mail.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований с использованием электромагнитного поля СНЧ-установки "Зевс". Рассмотрена высокочувствительная аппаратура для амплитудно-фазовых измерений поверхностного импеданса земной коры. Описаны результаты радиоимпедансных зондирований в дальней зоне источника на удалении 4000 км. Дана оценка вариаций поверхностного импеданса при подготовке сейсмических событий.

Введение

Знание электрических характеристик земной коры в КНЧ-СНЧ диапазонах необходимо для решения задач возбуждения и распространения КНЧ-СНЧ электромагнитных волн, определения электрического строения земной коры, в разведочной геофизике и электромагнитном мониторинге сейсмостектонических процессов [3,5-7,10,11]. До недавнего времени методы зондирования в КНЧ-СНЧ диапазонах использовали в основном естественные электромагнитные поля (ЕЭМП) или слабо контролируемые электромагнитные поля (поля линий электропередач – ЛЭП или электрифицированных железных дорог). Появление контролируемых источников СНЧ диапазона открыло новые возможности для изучения электрических характеристик земной коры.

В работах [13-15,17] показано, что для трех типов источников электромагнитного поля (вертикального и горизонтального электрических диполей, горизонтального магнитного диполя), начиная с расстояния $R > (2\div3)\lambda_z$ от источника, выполняются импедансные граничные условия ($\lambda_z = 3140/\sqrt{f\sigma}$ - длина волны в среде с проводимостью σ на частоте f). В статье предложен метод измерения комплексной величины поверхностного импеданса земной коры в СНЧ-диапазоне. Аппаратура основана на принципе синхронного детектирования слабых сигналов и реализована в виде чувствительного СНЧ-импедансметра для определения амплитудно-фазовой структуры электромагнитного поля.

Амплитудно-фазовые измерения поверхностного импеданса земной коры

В качестве зондирующего поля используется радиоволновое излучение горизонтальной заземленной линейной электрической антенны, питаемой высокостабильным синусоидальным током заданных частот. Поле СНЧ-излучателя характеризуется малым ослаблением при распространении в волноводе «Земля-ионосфера» (порядка 1 дБ на 1000 км на частотах около 100 Гц), что дает возможность проводить измерения импеданса в широком диапазоне расстояний от излучателя ($500 < R < 20000$ км). Расположенная на Кольском полуострове мощная сверхнизкочастотная (СНЧ) радиоустановка состоит из генератора синусоидального тока и горизонтально ориентированной и заземленной на концах антенны длиной около 60 км. Величина тока в антенне 200-300 А [10]. Диапазон рабочих частот составляет десятки-сотни герц (в экспериментах от 33 до 188 Гц). Для измерения поверхностного импеданса $\delta = E_\tau / (H_\tau Z_0)$ ($Z_0 = 377$ Ом – характеристический импеданс свободного пространства) разработано двухканальное устройство для одновременного приема и регистрации горизонтальных электрической E_τ и магнитной H_τ компонент поля (рис.1). Горизонтальная магнитная компонента H_τ принимается чувствительным магнитоиндукционным датчиком (МИД) с сердечником из материала с высокой магнитной проницаемостью. Перпендикулярная ей горизонтальная электрическая компонента E_τ принимается горизонтальным заземленным электрическим диполем длиной $l=100\div200$ м, представляющим собой трехэлектродную приемную линию с двумя потенциальными электродами, разнесенными на одинаковое расстояние от третьего центрального электрода, соединенного с «нулевой» клеммой аппаратуры. Симметричная схема датчика электрического поля позволяет с помощью дифференциального предусилителя устранить влияние помех, наводящих в каждом плече датчика синфазные сигналы. Датчики ориентированы на максимум поля излучателя. Измеритель E_τ имел высокое входное сопротивление, значительно превышающее сопротивление заземляющих электродов M и N . Для выделения полезного сигнала при малых соотношениях сигнал/шум использован принцип синхронного детектирования. Благодаря сужению эквивалентной шумовой полосы тракта приема $\Delta f_{ш} = 1/4\tau$ (τ - постоянная времени фильтра нижних частот (ФНЧ)) до значений порядка 0,001 Гц достигается хорошее соотношение сигнал/шум. Пороговая чувствительность каналов составляет $2\cdot10^{-8}$ А/м по H_τ и $5\cdot10^{-9}$ В/м по E_τ . В качестве усилителя и синхронного детектора с ФНЧ использовался фазочувствительный нановольтметр «Унирап 232В» (диапазон частот 1,5 Гц÷150 кГц. $U_{изм.} = 0,3$ мкВ ÷ 30 мВ, входной импеданс 1 МОм/20 пФ, постоянная времени τ 1 мс ÷ 100 с). Погрешность измерения в различных условиях составляет в среднем по модулю импеданса - 4%, по фазе импеданса - $(2-5)^\circ$.

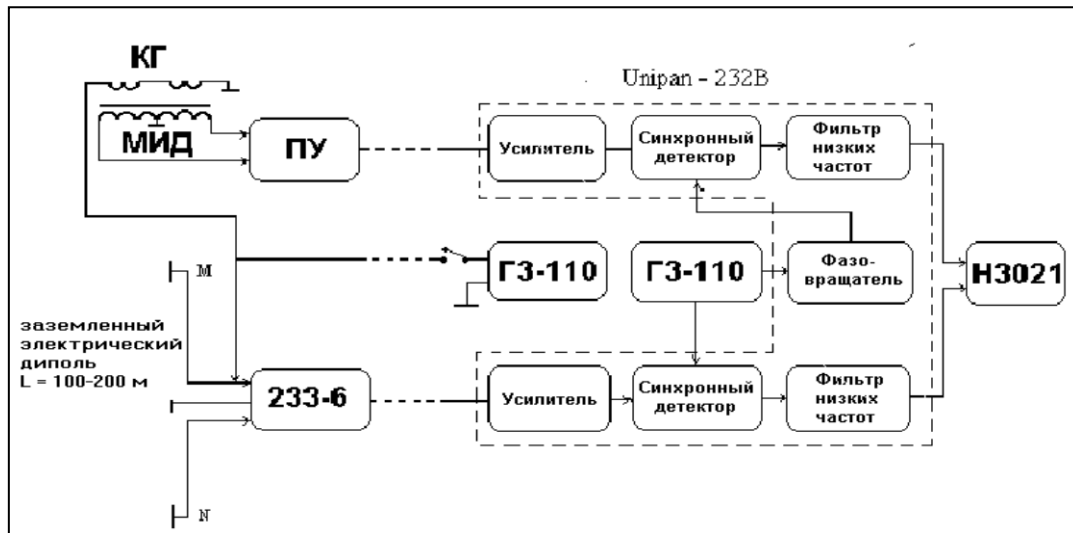


Рис. 1. Двухканальное устройство для измерения поверхностного импеданса.

Методика измерений поверхностного импеданса земной коры в СНЧ-диапазоне реализована следующим образом. Горизонтальная излучающая антенна питалась высокостабильным синусоидальным током. Число рабочих частот, последовательно излучаемых в эфир, достигало четырех. Уровни принимаемого поля составляли по $H_\tau = (1 \div 4) \cdot 10^{-7}$ А/м, по $E_\tau = 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-7}$ В/м и были соизмеримы или меньше уровня ЕЭМП. Измерения проводились в модификациях зондирования и профилирования. Затраты времени на измерения на одной частоте составляли 1÷1,5 ч, на четырех частотах - 4÷5 ч.

Полевые испытания, проведенные на более 90 пунктах наблюдений показали, что мобильный СНЧ-комплекс позволяет проводить измерения в самых различных погодных условиях (ближние грозы, дождь, ветер, снег, мороз до -25°C).

При использовании СНЧ-импедансметра достигаются следующие положительные эффекты [4]:

- измеряется фаза поверхностного импеданса земной коры в СНЧ-диапазоне радиоволн;
- повышается точность измерений за счет устранения влияния вертикальной составляющей электрического поля E_v , являющейся помехой при измерениях;
- повышается оперативность определения импеданса за счет сокращения времени измерений и экспресс-обработки данных непосредственно в процессе измерений;
- при расчетах электромагнитных систем учитывается комплексный характер эффективной электропроводности земной коры.

СНЧ-импедансметр определяет также абсолютные уровни напряженности поля E_τ и H_τ и пеленг на источник поля, что позволило использовать его для исследования условий распространения СНЧ-волн. Применение комплекса показало его высокую эффективность при работе в условиях горно-таежной местности с отсутствием дорожной сети. Устройство легко транспортировалось в заданный район наблюдений автомобилем или вертолетом.

Регулярные данные о вариациях взаимно перпендикулярных E_τ и H_τ составляющих поля (рис. 2) получены в 17 полусуточных сеансах (204 ч синхронных записей). В каждом сеансе измерения начинались в 2 часа местного времени и продолжались до 14 часов. В начале сеанса условия на трассе были ночными и, после прохождения терминатора, к концу сеанса — дневными. Уровень поля для каждой точки графика получен при усреднении четырех отсчетов амплитуды сигнала на диаграммной ленте. Полученные экспериментальные данные о вариациях уровня компонент E_τ и H_τ поля сводятся, в основном, к следующему. Уровень поля в течение сеанса изменяется в пределах, значительно превышающих погрешности

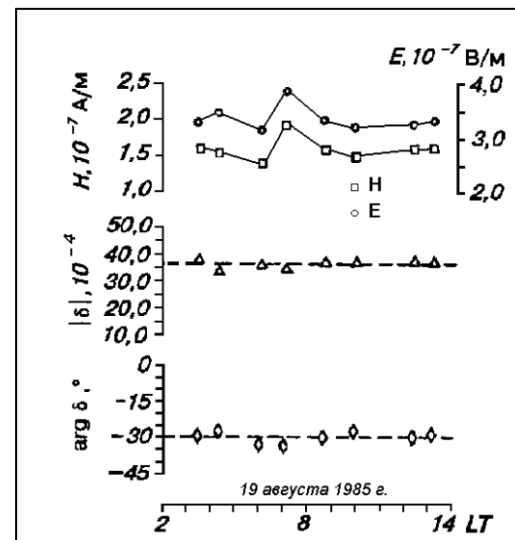


Рис. 2. Вариации уровня E_τ , H_τ , $|\delta|$ и $\varphi_\delta = \arg \delta$.

наблюдений. Прослеживается четкая закономерность — переход от высоких ночных уровней поля в начале каждого сеанса к низким дневным уровням происходит не монотонно. При приближении восхода Солнца в пункте наблюдения уровень поля падает, затем резко возрастает, достигая пиковых значений (локального максимума) через 1—1,5 ч после восхода. После этого вновь наблюдается спад до минимальных уровней, когда вся трасса оказывается в дневных условиях. Пример вариаций уровня E_τ и H_τ представлен на рис. 2.

Вариации компонент E_τ и H_τ поля происходят синхронно, коэффициент взаимной корреляции r изменяется от 0,61 до 0,99 и в 76 % случаев выше 0,9. Следовательно, эксперименты дают основание сделать вывод о независимости измеренных значений импеданса δ (в пределах погрешности измерений) от значительных и немонотонных вариаций уровня зондирующего поля. С методической точки зрения это следующее из теории свойство импеданса позволяет проводить его измерения в любое время суток.

Результаты полевых измерений поверхностного импеданса земной коры

В задачах распространения и возбуждения радиоволн основным параметром, характеризующим электрические свойства нижней стенки волновода «Земля-ионосфера», является поверхностный импеданс δ , учитывающий совокупное воздействие слоистой земной коры на электромагнитное поле. В литературе данные по реальным значениям поверхностного импеданса в СНЧ-диапазоне отсутствуют. Приведем экспериментальные данные, полученные на исследованной территории.

Измерения импеданса в СНЧ-диапазоне выполнены в 92 пунктах наблюдений, расположенных на различных комплексах горных пород (475 определений модуля и фазы поверхностного импеданса, включая режимные и методические наблюдения на ряде пунктов). Измерения проводились в модификациях зондирования на ряде частот и профилирования на одной частоте вдоль заданного профиля (табл. 1).

Таблица 1

f , Гц	$ \delta $, 10^{-3}			φ_δ , град.			$\rho_\sim$, кОм·м			N
	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	
33	0,19	8,9	3	-61	-14	-34	0,02	43	7,8	21
44	0,38	9,5	3,4	-49	-5	-28	0,06	37	7,5	23
82	0,6	26,6	7	-82	-7	-35	0,08	155	18,5	86
188	0,8	17,7	6,7	-52	-11	-30	0,06	30	6,6	31

Модуль импеданса $|\delta|$ на фиксированной частоте изменяется в широких пределах от минимальных до максимально возможных для СНЧ-диапазона. Фаза импеданса φ_δ принадлежит к индуктивной области и изменяется от -5 до -82° .

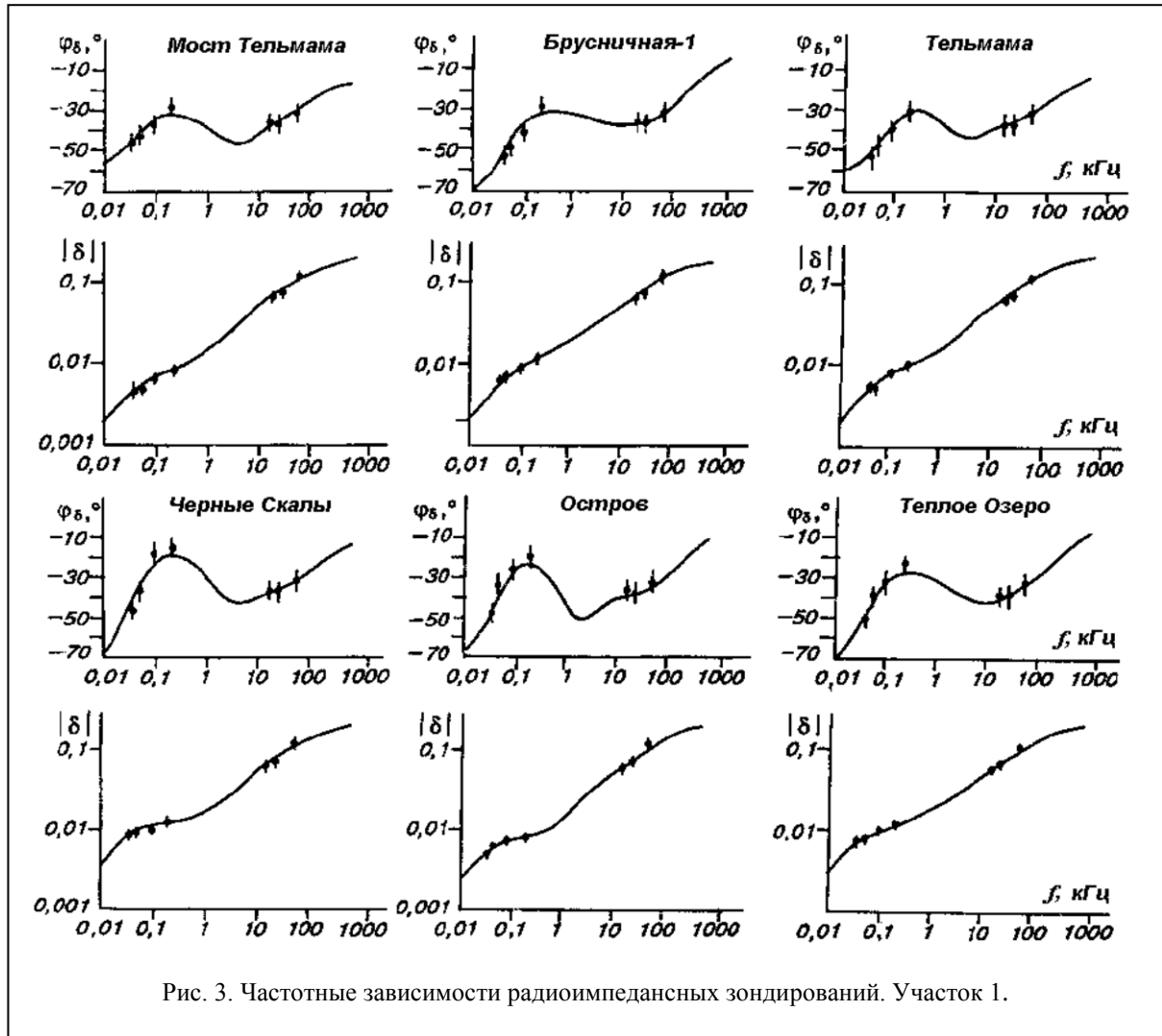
Континентальная кора имеет в ряде районов области очень высокого поверхностного импеданса, соизмеримого с импедансом ионосферной стенки волновода «Земля-ионосфера». Так для трехслойной модели ионосферной проводимости D и E областей, рассмотренной в работе А.Трэна и Ч.Полка [16], на частоте 80 Гц получены весьма близкие к максимальному импедансу земли (см. табл. 1) значения $|\delta| = 0,027$, $\varphi_\delta = -38^\circ$. В целом в диапазоне 33÷188 Гц для ионосферы величина $|\delta| = 0,02 \div 0,037$, а $\varphi_\delta = -49 \div -38^\circ$. Электрические характеристики консолидированной коры исследованного региона (и, вероятно, Балтийского, Анабарского, Алданского, Канадского щитов, Антарктиды и Гренландии) в СНЧ-диапазоне вполне сопоставимы с аналогичными характеристиками ионосферы.

Определение параметров геоэлектрического разреза по данным радиоимпедансного зондирования

Рассмотрим основные черты глубинного геоэлектрического строения двух исследованных участков, выявленные по результатам СНЧ-СДВ-радиоимпедансного зондирования. Первое зондирование в полевых условиях проведено в п.н. мыс Повалишина в 1980 г. Начиная с 1983 г. отряд Бурятского научного центра СО РАН проводил зондирования в различных районах Сибири. На первом этапе они проводились в областях с разным геолого-тектоническим строением. Целью исследований было получение информации об основных закономерностях в поведении импеданса и выявление районов, наиболее благоприятных для изучения распределения сопротивления в земной коре.

Для интерпретации частотной зависимости поверхностного импеданса использован метод регуляризации на основе гипотетического разреза. Решение сводится к построению приближенного геоэлектрического разреза (ГЭР), согласованного с имеющейся априорной информацией и обеспечивающего модельную невязку на уровне погрешности исходных данных [1].

Участок 1. Зондирования проводились в пределах крупного гранитоидного массива с целью изучения строения коры в областях выхода на поверхность древних пород большого сопротивления. Для зондирований в СНЧ-диапазоне выбирались изученные аэровариантом метода РЭМП в СДВ-диапазоне участки фундамента, сложенные гранитами [5]. Для оценки электрического разреза в широком диапазоне глубин использованы материалы МГЗ [12]. Верхняя часть разреза охарактеризована по данным РЭМЗ и ВЭЗ, выполнявшихся в районах пунктов наблюдения. Выбранные участки зондирования расположены в пределах сравнительно однородного гранитоидного массива, обладающего сопротивлением верхней части $5 \cdot 10^3$ — 10^4 Ом·м. При интерпретации для повышения надежности и устойчивости решения использованы также данные СДВ-измерений импеданса на частотах 17—50 кГц [5]. Результаты интерпретации в рамках 5-слойной модели для 6 пунктов зондирования на гранитоидном массиве приведены в табл. 2 и на рис. 3.



Априорные представления о пределах изменения сопротивления различных по глубине частей гранитоидного массива, сужающие в разумных пределах интервал поиска параметров, были получены по данным работы [12]. Теоретические кривые $|\delta|$ и φ_{δ} , соответствующие интерпретируемым разрезам (рис. 3) хорошо совпадают с амплитудно-фазовыми экспериментальными данными. Небольшой разброс данных на фазовых кривых φ_{δ} позволяет с их помощью существенно улучшить качество интерпретации, поскольку близость их к рассчитанным значениям указывает на отсутствие существенных ошибок как в измерениях фазы импеданса, так и в построении и интерпретации выбранной одномерной модели разреза. При выборе модели и количества слоев мы исходим из вида фазовых кривых — наличия сильноиндуктивных значений $\varphi_{\delta} < -45^\circ$ на частоте 33 Гц, прямо указывающих на существование корового проводящего слоя $\rho_5 < \rho_{2-4}$.

Таблица 2

Результаты интерпретации. Участок 1.

Пункты наблюдения	Параметры разреза: ρ_j , Ом·м; h_j , м									
	ρ_1	h_1	ρ_2	h_2	ρ_3	h_3	ρ_4	h_4	ρ_5	h_5
Мост Тельмама	1200	10	6000	290	3000	480	15000	7000	2000	∞
Брусничная-1	400	3	6000	350	8600	580	24000	9400	600	∞
Тельмама	1200	8	6200	870	1800	130	34000	6300	2000	∞
Черные Скалы	1200	8	6100	850	1900	75	129000	17400	270	∞
Остров	800	4	5300	670	550	110	130000	9900	320	∞
Теплое Озеро	400	2	6100	350	7400	600	41600	13600	350	∞

Ограниченность частотного диапазона не позволяет охарактеризовать свойства нижней части разреза и провести более точную количественную интерпретацию путем прямых теоретических расчетов полной кривой. Анализ данных МТЗ в диапазоне периодов $1\text{--}10^3\text{ с}$ выявил севернее и южнее района исследований понижение сопротивления коры до первых десятков Ом·м на глубине 10—15 км [12]. Поведение фазовых кривых φ_δ на частотах 33 и 44 Гц в пределах гранитоидного массива подтверждает существование проводящего слоя на глубине 7—17 км и хорошо согласуется с результатами расчетов, которые были проведены для модели коры, имеющей на глубине 10—20 км коровый проводящий слой [3]. Результаты СНЧ-измерений импеданса позволяют уточнить положение высокочастотной ветви кривой эффективного сопротивления $\rho_\sim = 60\lambda|\delta|^2$ (λ - длина волны в свободном пространстве). СДВ-СНЧ-МТ-данные (рис. 4) указывают положение асимптоты для модели высокоомного слоя на проводящем основании на глубине более 10 км. Явно выраженный спад кривой $\rho_\sim$ в сторону малых периодов СДВ-диапазона свидетельствует о том, что верхняя часть гранитоидного массива толщиной до 1—2 км обладает относительно низким сопротивлением, обычно это зона трещиноватых и увлажненных гранитов. Сопротивление высокоомного гранитного слоя может иметь значения $\rho = 15000\div 200000$ Ом·м. Фазовые данные СНЧ-СДВ-диапазонов подтверждают такую модель глубинного строения гранитоидного массива.

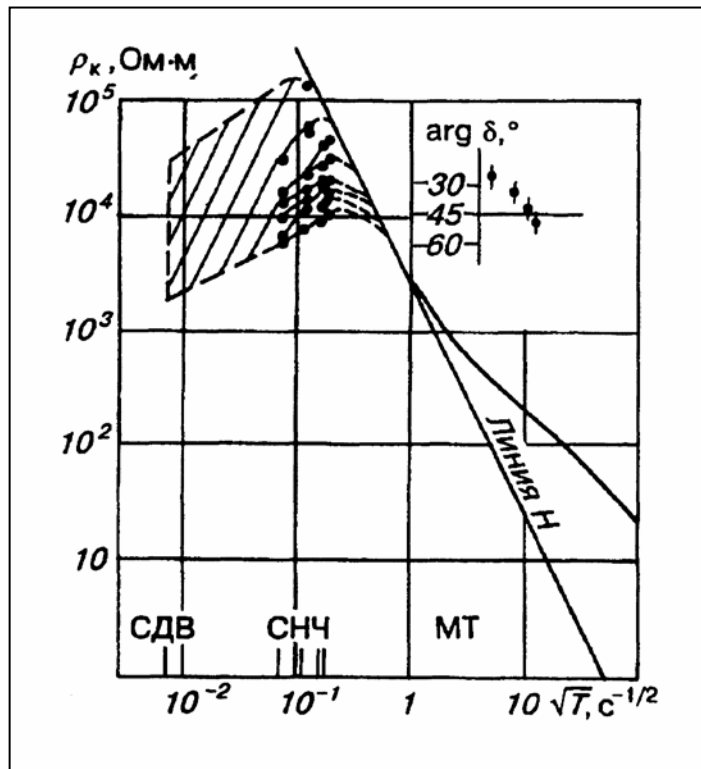


Рис. 4. Результаты СДВ-СНЧ-МТ - измерений на гранитоидном массиве.

Участок 2. В областях с осадочным чехлом СНЧ-зондирования проводились на тех участках, для которых верхняя часть разреза аппроксимировалась горизонтально-слоистой средой. Поиски таких участков осуществлялись на основе площадных исследований высокопроизводительным методом СДВ-профилирования с борта самолета [5]. Одномерная интерпретация частотных зависимостей $|\delta|$ и φ_δ в пунктах 64, 65, 67, 78 — 80 с привлечением данных на частотах сверхдлинноволнового — длинноволнового диапазонов дает следующие результаты (см. рис. 5 и табл. 3): для кристаллических массивов с развитой корой выветривания характерен трех-слойный разрез типа $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$. Верхний слой осадочного чехла толщиной до 150 м имеет небольшое сопротивление от 100 до 700 Ом·м, затем расположен довольно обширный по глубине слой толщиной от 2 до 6 км с сопротивлением от 1000 до 12000 Ом·м (обводненные и трещиноватые гранитоиды), и, наконец, следует слой консолидированной коры повышенного сопротивления (93000—153000 Ом·м). Повышение сопротивления слоя на глубинах от 2 до 6 км происходит вследствие уменьшения пористости пород и их влажности. Таким обра-

зом, глубинный электрический разрез может быть описан трехслойной моделью типа A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) с плохопроводящим фундаментом. Коровый проводящий слой на величину φ_δ не влияет, для детального его изучения необходимо расширение диапазона частот до 0,03 - 3 Гц.

Таблица 3.

Результаты интерпретации. Участок 2.

Пункт наблюдения	Параметры ГЭР: ρ_j , Ом·м, h_j , м					
	ρ_1	h_1	ρ_2	h_2	ρ_3	h_3
Булуктын Жалга	240	54	2000	2600	93000	∞
Майла	250	65	7600	5800	153000	∞
Ангир 2	350	50	12000	4100	121000	∞
Моковка	130	15	1600	1900	105000	∞
Мэгдэлгэн	350	70	1100	2000	105000	∞
Озеро	720	146	5700	3900	118000	∞

Анализ зондирований, проведенных на участке 2, который удален от участка 1 на 1000 км к югу, показал, что помимо противоположной частотной зависимости фазы импеданс, слой с повышенным сопротивлением на глубине от 1 до 12 км на участке 1 дает модуль импеданса выше в 3 и более раз. Ход кривых δ во всех пунктах отчетливо выявляет повышение сопротивления, связанное с переходом к породам гранитоидного ряда, а стратификация осадочного чехла в этих пунктах зондирования затруднена из-за отсутствия фазовых данных в области частот выше 10^4 Гц. Положение и вид частотных кривых $|\delta|$ и φ_δ в диапазоне 33-188 Гц лучше согласуется с расчетными при увеличении сопротивления коры ρ_3 от $5 \cdot 10^4$ до $1,5 \cdot 10^5$ Ом·м (рис. 5).

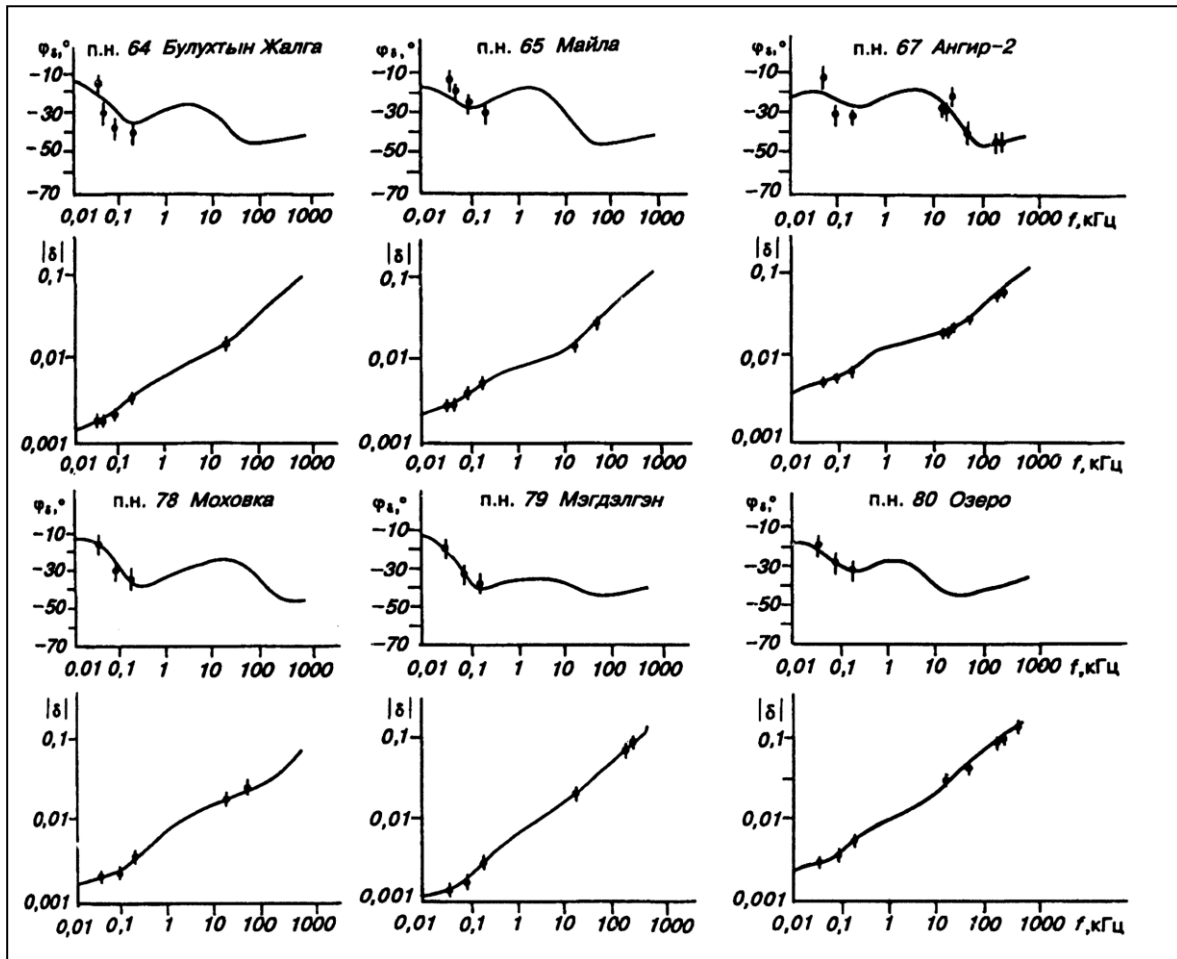


Рис. 5. Частотные зависимости радиоимпедансных зондирований. Участок 2

Оценка вариаций поверхностного импеданса при подготовке сейсмических событий

Имеются убедительные данные о связи между изменениями сопротивления горных пород во времени и сейсмическим процессом. Исследования, проведенные в Гармском сейсмоактивном районе методом дипольного электрического зондирования с разносом между центрами питающего и приемного диполей 6 км, показали, что изменения кажущегося сопротивления горных пород ρ_k , коррелированные с моментами относительно сильных местных землетрясений (энергетический класс $K=10-13$) достигают 7-18 % в сторону уменьшения [2]. В Байкальском сейсмоактивном районе проводятся работы по применению различных методов электромагнитного зондирования с использованием естественных и искусственных полей для контроля за изменениями электросопротивления в земной коре. В работе [9] приводятся данные моделирования электромагнитного эффекта в зонах подготовки землетрясений в диапазоне геомагнитных пульсаций и оцениваются возможности МТЗ для обнаружения ожидаемого эффекта. Возможности применения метода зондирования становлением электромагнитного поля для режимных наблюдений исследуются в [8]. Электрические свойства верхней части земной коры в КНЧ-НЧ диапазонах и обобщенные геоэлектрические разрезы впадин Байкальской рифтовой зоны, Сибирской платформы и юго-западной Якутии рассмотрены в работах [3,5]. Байкальский регион выделяется широким распространением кристаллических горных пород (за исключением платформенной части), сопротивление которых может достигать $1,5 \cdot 10^5$ Ом·м. Характерной особенностью электрического строения региона является наличие проводящего корового слоя [9], который в рифтовой зоне смещен ближе к земной поверхности и обладает большей проводимостью. Для всего региона характерна коровая сейсмичность, т.е. очаги землетрясений расположены преимущественно в земной коре. По литературным данным выделяют наиболее сейсмоактивный слой земной коры 0-10 км. При этом проводящий коровый слой ограничивает очаговый слой снизу и рассматривается как один из сейсмоконтролирующих факторов [9]. Глубина проникновения КНЧ-СНЧ электромагнитного поля в земную кору вполне сравнима с толщиной сейсмоактивного слоя земной коры. Так на частоте 1-го шумановского резонанса при сопротивлении 10^2 Ом·м толщина скин-слоя составляет 2 км и увеличивается при $\rho = 10^5$ Ом·м до 56 км. На частоте 300 Гц при таких же сопротивлениях скин-слой будет составлять от 300 м до 9 км. Чтобы оценить возможность применения КНЧ-СНЧ электромагнитного поля для контроля за сейсмической активностью, были проведены расчеты влияния изменения сопротивления в земной коре на поверхностный импеданс δ , т.е. по сути, на соотношение электрической и магнитной компонент поля на границе раздела. Геоэлектрическое моделирование зоны подготовки землетрясения (рис. 6) осуществлялась для двух базовых моделей геоэлектрического разреза земной коры Байкальского региона с коровым проводящим слоем на глубине 12 км: 1) модель с высокоомным фундаментом (2-й слой) - $\rho_1 = 5000$ Ом·м, $h_1 = 0.62$ мили; $\rho_2 = 100000$ Ом·м, $h_2 = 11$ км, $\rho_3 = 50$ Ом·м, $h_3 = \infty$ (см. рис. 6 а, в); 2) модель с низкоомным фундаментом - $\rho_1 = 100$ Ом·м, $h_1 = 0,5$ км; $\rho_2 = 4000$ Ом·м, $h_2 = 11,5$ км, $\rho_3 = 50$ Ом·м, $h_3 = \infty$ (см. рис. 6 б, г). Зона подготовки землетря-

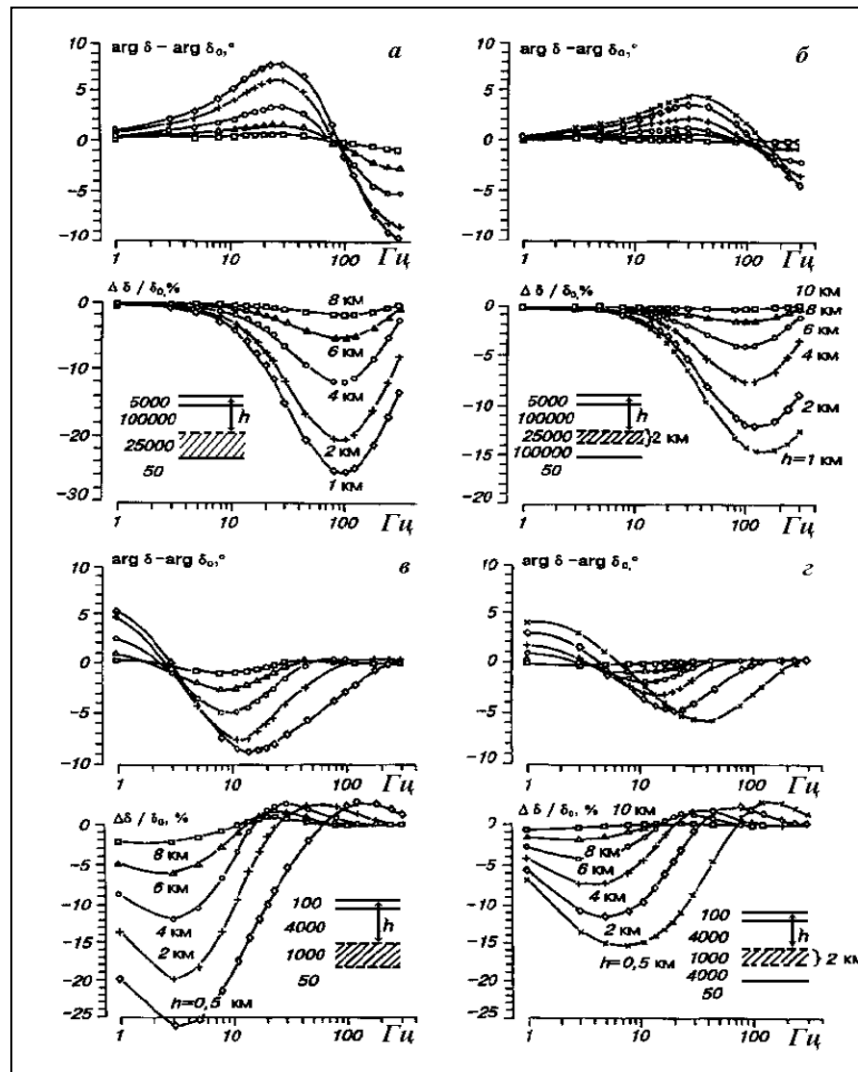


Рис.6. Геоэлектрическое моделирование зоны подготовки землетрясения

двух базовых моделей геоэлектрического разреза земной коры Байкальского региона с коровым проводящим слоем на глубине 12 км: 1) модель с высокоомным фундаментом (2-й слой) - $\rho_1 = 5000$ Ом·м, $h_1 = 0.62$ мили; $\rho_2 = 100000$ Ом·м, $h_2 = 11$ км, $\rho_3 = 50$ Ом·м, $h_3 = \infty$ (см. рис. 6 а, в); 2) модель с низкоомным фундаментом - $\rho_1 = 100$ Ом·м, $h_1 = 0,5$ км; $\rho_2 = 4000$ Ом·м, $h_2 = 11,5$ км, $\rho_3 = 50$ Ом·м, $h_3 = \infty$ (см. рис. 6 б, г). Зона подготовки землетря-

сения задавалась двумя способами. В первом случае уменьшение сопротивления фундамента в четыре раза захватывало варьируемую по толщине область, начиная от кровли проводящего корового слоя. Во втором случае уменьшение сопротивления в фундаменте задавалось в 2-километровом слое, варьировалось положение этой области в пределах кристаллического фундамента (2-го слоя базовой модели). Как видно из рис.6, эффект влияния на поверхностный импеданс уменьшения сопротивления в определенной области фундамента имеет выраженный частотно-зависимый характер. Это обусловлено двумя противодействующими факторами: увеличением экранирующего влияния перекрывающей толщи разреза с ростом частоты и уменьшением разрешающей способности зондирующего поля с падением частоты. Для высокоомного разреза земной коры максимальный эффект проявляется в верхней части рассматриваемого диапазона частот (СНЧ), в случае низкоомного разреза он смещается в область более низких частот (КНЧ).

Величина максимального эффекта зависит от мощностей перекрывающей толщи пород и самой области понижения сопротивления. Изменения модуля импеданса превышают 10 % при глубине области понижения сопротивления 4 км в случае, когда область понижения начинается с подошвы фундамента (см. рис. 6 а, в), и 2 км для 2-километрового слоя пониженного сопротивления (см. рис. 6 б, г). Максимальное изменение модуля импеданса достигает 25 и 15 % соответственно, когда область понижения сопротивления достигает подошвы 1-го слоя разреза. Изменения фазы импеданса происходят в зависимости от частоты в сторону как слабоиндуктивных, так и сильно-индуктивных импедансов, достигая 10^0 при заданных условиях моделирования зоны подготовки землетрясения.

Возможности регистрации ожидаемых изменений поверхностного импеданса в зонах подготовки землетрясений определяются чувствительностью используемых методов. Так, в методе магнитотеллурического зондирования трудно полностью исключить влияние нестабильности источника и помех в магнитотеллурическом поле [9]. Эта проблема сохраняется в значительной степени и при использовании естественных КНЧ-СНЧ излучений. Данные о точности определения импеданса земной коры с использованием искусственного поля и ЕЭМП получены при наблюдениях полусуточных и суточных вариаций E и H горизонтальных компонент поля над средой с известными электрическими свойствами. Они представлены в [5].

Из анализа результатов моделирования и экспериментальных данных по точности измерений модуля и фазы импеданса следует:

- для выбора оптимального частотного диапазона наблюдений необходимо определить геоэлектрические разрезы земной коры во всех пунктах режимных наблюдений;
- с помощью естественных и искусственных КНЧ-СНЧ электромагнитных полей возможно обнаружить изменения импеданса при подготовке сейсмического события, если они превышают 5-10 % по модулю и $3\text{--}5^0$ по фазе импеданса;
- применение контролируемого источника СНЧ поля типа "Зевс" может дать существенное повышение точности определения вариаций импеданса земной коры при мониторинге сеймотектонических процессов.

На основе реализованной точности метода глубинного СНЧ зондирования показана принципиальная возможность и эффективность его использования для электромагнитного мониторинга сеймотектонических процессов в Байкальской рифтовой зоне.

Заключение

Предложен СНЧ - импедансметр для диагностики электрического состояния и структуры верхней части земной коры. Синхронно зарегистрированное отношение горизонтальных взаимно-перпендикулярных компонент электрического и магнитного полей на границе раздела (поверхностный импеданс) с точностью до погрешности эксперимента сохраняется постоянным при значительных (до 3 раз) и немонотонных вариациях уровня поля, связанных с изменением условий возбуждения и распространения зондирующего поля, в том числе положения линии терминатора относительно пункта приема. Радиоимпедансные зондирования с использованием электромагнитного поля СНЧ радиостанции позволяют исследовать геоэлектрический разрез земной коры до глубины 10-20 км на значительных (примерно 4000 км) расстояниях от источника. В результате серии зондирований, проведенных с помощью разработанного СНЧ-импедансметра в условиях естественных и промышленных помех, удалось достоверно определить характер ГЭР и оценить сопротивление верхней части земной коры. Постановка СНЧ-зондирования в диапазоне частот 33÷188 Гц на гранитоидном кристаллическом массиве позволила выявить на глубинах 7–17 км понижение сопротивления коры до 270 – 2000 Ом·м. Аналогичное понижение сопротивления в коре отмечено также в ряде районов Балтийского и Канадского щитов. МТЗ севернее и южнее гранитоидного массива показали присутствие корового проводящего слоя [12]. Экспериментально установлено наличие обширных областей высокого импеданса, соизмеримого в СНЧ-диапазоне с импедансом ионосферной стенки волновода «Земля-ионосфера». СНЧ-импедансметр может быть использован и для абсолютных измерений поля и пеленгации.

Авторы выражают благодарность Л.А. Собчакову из Российского института мощного радиостроения, В.Е. Пониматкину, Л.Б. Песину, В.И. Агапонову, А.С. Панфилову из Управления связи ВМФ России за возможность использования поля СНЧ радиоустановки «Зевс». Мы помним и ценим огромный вклад в дело создания «Зевса» Ю.Э. Удальева, А.В. Яковлева и А.В. Вешева.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 96-05-66209.

Список литературы

1. Ангархаева Л.Х., Башкуев Ю.Б., Мельчинов В.П. Обратная задача для слоистой импедансной среды. Радиотехника и электроника, 1997. Т. 42. № 10. С. 1169-1173.
2. Барсуков О.М., Сорокин О.Н. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмо-активном районе. Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1973. № 10. С. 100-102.
3. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Цыдыпов Ч.Ц., Буянова Д.Г. Естественное электромагнитное поле в Забайкалье. М.: Наука, 1989. 112 с.
4. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Способ и устройство для измерения поверхностного импеданса земной коры в сверхнизкочастотном диапазоне // Авторское свидетельство № 299005, 01.08.1989 г., описание изобретения А.С. SU 1840791 A1 G01V 3/12. Бюллетень № 36. 27.12.2009.
5. Башкуев Ю.Б. Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996. 207с.
6. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона. ДАН. 1994. Т. 338. №1. С. 106-109.
7. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н. и др. Глубинные электромагнитные исследования с применением мощных сверхнизкочастотных радиоустановок. // Физика Земли. 1998. № 8. С.3-22.
8. Морозова Г.М., Ельцов И.Н., Глинский Б.М. и др. О результатах глубинных зондирований становлении магнитного поля и некоторые вопросы электромагнитного просвечивания сейсмоактивных зон. Исследования по поискам предвестников землетрясений в Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. С 45-55.
9. Попов А.М., Бывальцева Т.Ф. Геоэлектрические условия зон подготовки землетрясений Прибайкалья на основе данных магнитотеллурических исследований и ионосферного зондирования. Сейсмичность Байкальского рифта. Новосибирск: Наука, 1988. С. 57-70.
10. Сараев А.К., Собчаков Л.И., Васильев А.В. и др. Перспективы использования СНЧ радиоустановки для решения геологогеофизических задач. Тезисы докладов Междунар. конф. "Закономерности эволюции земной коры". СПб. 1996. Т.1. С. 1-270.
11. Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И. и др. Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов. // Физика Земли. 1997. № 5. С.36-46.
12. Фадеев В.М., Поспеев В.И. Геоэлектрическая модель Бодайбинского рудного узла//Ускорение НТП при геофизических исследованиях в Восточной Сибири. ВС НИИГГи МС. Иркутск. 1989. С.73-78.
13. Burrows M.L. ELF Communication Antennas. P. Peregrinus Ltd, 1978. 245 p.
14. Burrows M.L. Surface impedance and the efficiency of horizontal-dipole extremely low frequency (ELF) antenna arrays. // IEEE Trans. Communs., 1974. V. 22. N. 4. P. 399-401.
15. Galeys I. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves. — N.Y.: Pergamon Press, 1972. 362 p.
16. Tran A., Polk C. Shumann resonances and electrical conductivity of the atmosphere and lower ionospheres 1. Effects of conductivity at various altitudes on resonance frequencies and attenuation // J. Atmos. and Terr. Phys. 1979. V. 41. P. 1241—1248.
17. Wait, I.R. Electromagnetic waves in stratified media. — Oxford - Paris; Pergamon Press, 1962. 372 p.

Анализ условий распространения СНЧ радиоволн на трассе «Зевс» - Забайкалье»

Ю.Б. Баикуев, В.Б. Хантанов, А.В. Ханхараев

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, buddich@mail.ru

В статье рассматриваются результаты измерений абсолютных уровней H_z и E_z компонент электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки «Зевс», проведенных в Забайкалье на частотах 33, 44, 82 и 188 Гц. Проведен анализ вариаций H_z и E_z в 17 полусуточных сеансах (около 204 часов синхронных записей). Длина трассы «Зевс - Забайкалье» составляет приблизительно 4000 км.

Введение

Интерес радиофизиков и геофизиков к СНЧ диапазону обусловлен особенностями распространения СНЧ электромагнитных волн в волноводе «Земля-ионосфера» [3,7-10]. Известно, что распространение СНЧ волн сопровождается глубоким их проникновением в стенки волновода – проводящие и диссипативные среды: земную кору, морскую воду, плазму. На частоте около 100 Гц СНЧ волны проникают на акваториях морей на глубину до 100 м, а на территориях кристаллических щитов – на глубину до 10-15 км [1,2].

В то же время экспериментально установлено, что при распространении СНЧ волны очень слабо затухают. Ослабление уменьшается с 10-20 дБ/1000 км на частоте 1 кГц до (1÷2) дБ/1000 км на частоте 100 Гц, что делает возможной высокостабильную связь с удаленными объектами вследствие слабой зависимости параметров распространения СНЧ волн от возмущений ионосферы.

В статье рассматриваются результаты измерений абсолютных уровней H_z и E_z компонент электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки «Зевс», проведенных в Забайкалье на частотах 33, 44, 82 и 188 Гц. Проанализированы вариации H_z и E_z в 17 полусуточных сеансах (около 204 часов синхронных записей). Большая мощность СНЧ-радиоустановки «Зевс», расположенной на Кольском полуострове (69° с.ш., 33° в.д.), дает возможность регистрации сигналов на расстояниях в тысячи километров, в нашем случае длина трассы «Зевс – Забайкалье» около 4000 км.

Аппаратура и методика экспериментальных исследований

В экспериментах по распространению СНЧ радиоволн используется радиоволновое излучение горизонтальной заземленной линейной электрической антенны, питаемой высокостабильным синусоидальным током заданных частот. Поле СНЧ-излучателя характеризуется малым ослаблением при распространении в волноводе «Земля-ионосфера» (порядка 1 дБ на 1000 км на частотах около 100 Гц), что дает возможность проводить измерения поля в широком диапазоне расстояний от излучателя ($500 < R < 20000$ км).

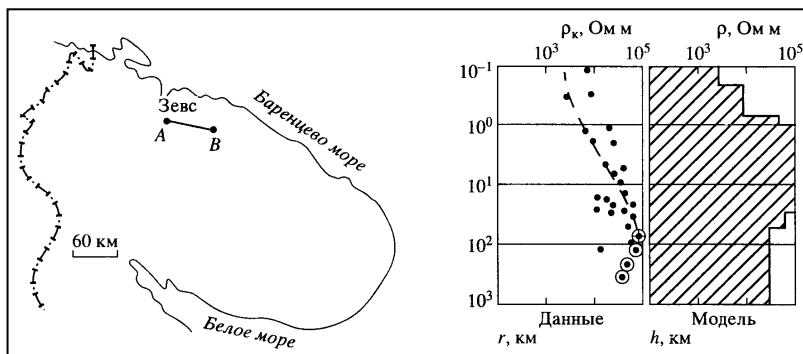


Рис. 1. Схема расположения СНЧ-установки «Зевс» и модель проводимости земли в месте её расположения [3].

Нестабильность задающего генератора не хуже 10^{-7} . Мощность излучения достаточна для уверенной регистрации сигналов на удалениях до 10 тыс. км. Коэффициент преобразования тока в поле в среднем составляет 10^{-5} . Мощность генераторной установки «Зевс» – 2.5 МВт.

Для измерения СНЧ поля разработано двухканальное устройство для одновременного приема и регистрации горизонтальных электрической E_z и магнитной H_z компонент поля (рис.2).

СНЧ-установка «Зевс» [3] расположена на северо-западе Кольского полуострова (рис.1). Передатчик состоит из двух генераторов синусоидального напряжения и двух параллельных несимметричных заземленных антенн длиной 55 и 60 км. Генераторы обеспечивают ток в антеннах до 200-300 А в диапазоне частот от 20 до 250 Гц с шагом 0.1 Гц. Антенны расположены на поверхности однородного плохо-проводящего Мурманского блока архейского возраста с эффективной проводимостью не более $2 \cdot 10^{-5}$ См/м. Эквивалентный магнитный момент антенны достигает $(1.5-2) \cdot 10^{11}$ А·м².

Горизонтальная магнитная компонента H_z принимается чувствительным магнитоиндукционным датчиком (МИД) с сердечником из материала с высокой магнитной проницаемостью. Перпендикулярная ей горизонтальная электрическая компонента E_z принимается горизонтальным заземленным электрическим диполем длиной $l = 100 \div 200$ м, представляющим собой трехэлектродную приемную линию с двумя потенциальными электродами, разнесенными на одинаковое расстояние от третьего центрального электрода, соединенного с «нулевой» клеммой аппаратуры. Симметричная схема датчика электрического поля позволяет с помощью дифференциального предусилителя устранить влияние помех, наводящих в каждом плече датчика синфазные сигналы. Датчики ориентированы на максимум поля излучателя. Измеритель E_z имеет высокое входное сопротивление, значительно превышающее сопротивление заземляющих электродов M и N . Для выделения полезного сигнала при малых соотношениях сигнал/шум использован принцип синхронного детектирования. Благодаря сужению эквивалентной шумовой полосы тракта приема $\Delta f_{ш} = 1/4\tau$ (τ - постоянная времени ФНЧ) до значений порядка 0,001 Гц достигается хорошее соотношение сигнал/шум. Пороговая чувствительность каналов составляет $2 \cdot 10^{-8}$ А/м по H_z и $5 \cdot 10^{-9}$ В/м по E_z . В качестве усилителя и синхронного детектора с ФНЧ использовался фазочувствительный нановольтметр «Unipan 232В» (диапазон частот 1,5 Гц ÷ 150 кГц, $U_{изм.} = 0,3$ мкВ ÷ 30 мВ, входной импеданс 1 МОм/20 пФ, постоянная времени τ 1 мс ÷ 100 с). СНЧ-комплекс определяет абсолютные уровни напряженности поля E_r и H_r и пеленг на источник поля, что позволило использовать его для исследования условий распространения СНЧ-волн [8]. Погрешность измерений в различных условиях составляла в среднем по амплитуде поля $\pm (3 \div 6) \%$, по разности фаз $-(2 \div 5)^\circ$. Применение комплекса показало его высокую эффективность при работе в условиях горно-таежной местности с отсутствием дорожной сети. Устройство легко транспортировалось в заданный район наблюдений автомобилем или вертолетом. Полевые испытания, проведенные на более 90 пунктах наблюдений, показали, что мобильный СНЧ-комплекс позволяет проводить измерения в самых различных погодных условиях (ближние грозы, дождь, ветер, снег, мороз до -25°C).

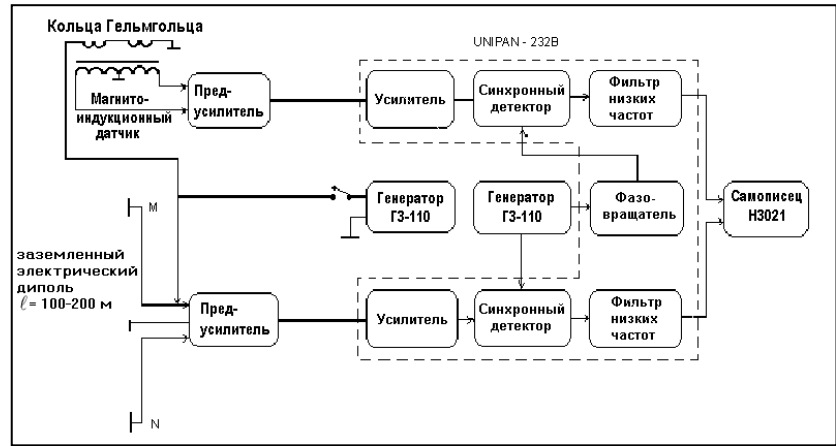


Рис. 2. Двухканальное устройство для измерения СНЧ-радиополя.

Результаты измерений и анализ условий распространения СНЧ радиоволн

Измерения СНЧ-поля проводились в различных районах Забайкалья. Число рабочих частот, излучаемых в эфир, достигало четырех (33, 44, 82, 188 Гц). Уровни принимаемого поля составляли по $H_z = (0,6 \div 4) \cdot 10^{-7}$ А/м, по $E_z = (0,17 \div 4,5) \cdot 10^{-7}$ В/м и были соизмеримы или меньше уровня естественного электромагнитного поля Земли (табл. 1, 2). Спектральная плотность горизонтальной магнитной компоненты СНЧ-шума определялась как

$$N_H^{1/2} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot f^{-1,1}, \text{ А/м} \sqrt{\text{Гц}}$$

Рассмотрим результаты расчетов напряженности магнитного поля H_z для прямой волны, распространяющейся по кратчайшему расстоянию между приемником и излучателем [3]:

$$H_r = \frac{If}{240\pi} \left(\frac{2\pi\mu_0}{c} \right)^{1/2} \frac{\cos \varphi}{h[\sigma(c/v_\phi)^{-1}]^{1/2}} \frac{\exp(-\alpha' d)}{[a \sin(d/a)]^{1/2}},$$

где I – ток в антенне, равный 300А; l – длина антенны, равная 55 км; f – частота, Гц; a – радиус Земли, 6371 км; c – скорость света; φ – угол между осью антенны и направлением на точку наблюдения, град.; $h\sqrt{\sigma(c/v_\phi)^{-1}}$ – коэффициент возбуждения, описывающий влияние проводимости земли под передающей антенной σ , высоты ионосферы над излучателем h и отношения (c/v_ϕ) на связь антенны с волноводом; α' – коэффициент затухания в волноводе, Нп/м, связан с α [дБ/Мм] соотношением $\alpha = 8,68\alpha' 10^6$. Для частот 5 – 1000 Гц отношение c/v_ϕ изменяется в пределах 1.1–1.4, в расчетах $c/v_\phi = 1.26$. Величина $Il/\sqrt{\sigma}$ принята равной $1.95 \cdot 10^9 \text{ Ам}^{3/2}/\text{См}^{1/2}$. Угол φ изменялся в пределах 11° – 21° , а расстояние от излучателя до точки приема $d = 3800 \div 4200$ км.

Таблица 1.

Пределы изменения и средние уровни H_z , полученные в экспериментах 1983-1985 гг.

$H_z, 10^{-7} \text{ А/м}$	Частота, Гц				Район, период экспериментов
	33	44	82	188	
<u>мин.-макс.</u> среднее	<u>0,94-1,35</u> 1,11	<u>0,77-1,37</u> 1,07	<u>1,24-2,36</u> 1,59 ночь	<u>1,09-1,89</u> 1,51 день	52° с.ш., 108° в.д. 25.08-20.10.83
<u>мин.-макс.</u> среднее	<u>0,85-1,14</u> 1,02	<u>0,96-1,22</u> 1,11	<u>1,34-1,93</u> 1,54 день	<u>1,13-2,02</u> 1,44 день	58° с.ш., 114° в.д. 16.08-8.09.84
<u>мин.-макс.</u> среднее	<u>1,53-1,58</u> 1,55 ночь-день	<u>1,56-1,6</u> 1,58 ночь-день	<u>1,6-1,75</u> **) 1,68 ночь-день	<u>1,18-1,23</u> 1,2 ночь-день	оз. Байкал *) 17-21.03.85

Все результаты приведены к току 300 А.

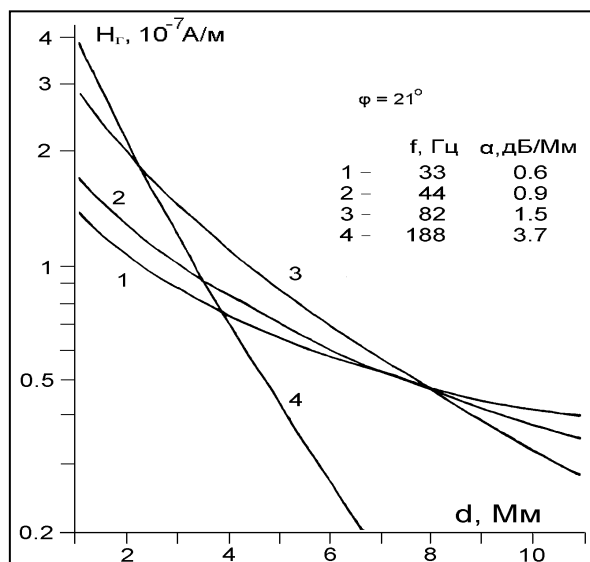
*) без нормирования к току 300 А;

**) частота 84 Гц.

Таблица 2.

Пределы изменения H_z и E_z компонент электромагнитного поля летом 1985 г.

Частота, Гц	33	44	82	188
$(H_z)_{\text{макс}}/(H_z)_{\text{мин}}, 10^{-7} \text{ А/м}$	2 / 0.8	4 / 0.7	3.1 / 0.8	3.8 / 0.6
$(E_z)_{\text{макс}}/(E_z)_{\text{мин}}, 10^{-7} \text{ В/м}$	1.8 / 0.21	3.2 / 0.17	4.5 / 0.18	4.3 / 0.5

Рис. 3. Уровни H_z , рассчитанные для средних значений коэффициента затухания α' .

Можно предположить, что на широте излучателя (69° с.ш.) летние колебания дневной и ночной высоты ионосферы могут компенсироваться уменьшением отношения (c/v_ϕ) , имеющим по расчетам Я. Галейса тот же порядок [8]. Если учесть, что σ с увеличением частоты обычно растет, а (c/v_ϕ) уменьшается, то, упрощая ситуацию, можно считать, что величина $\{h \cdot [\sigma \cdot (c/v_\phi)^{1/2}]\}^{-1}$ приблизительно постоянна на всех частотах для дневных и ночных условий, а значительные изменения испытывает только α . Высота ионосферы h в большинстве расчетов равнялась 50 км, что примерно соответствует дневным условиям распространения на частотах 44–82 Гц. Расчеты выполнены для значений α , изменяющихся в пределах $\pm(20-30)\%$ от величины коэффициента затухания, выбравшегося по литературным данным с учетом соотношений: $\alpha [\text{дБ/Мм}] \approx 2f/100$ – дневные условия, $\alpha \approx 1,3(f/100)^{1/2}$ – ночные условия.

Расчетные кривые уровня H_z для средних значений коэффициента затухания α представлены на рис. 3. На расстоянии 4000 км максимальный уровень

поля должен наблюдаться на частоте 82 Гц. На рис. 4 приведены расчетные кривые напряженности поля H_z на фиксированных частотах для различных значений α и h . Здесь же указаны пределы изменения и средние уровни H_z , полученные в результате экспериментов. Сравнение расчетных и измеренных значений H_z показывает их хорошее соответствие. Следует отметить, что по данным табл. 1 средние значения H_z на частотах 82 и 188 Гц примерно в 1,5 раза выше, чем на частотах 33 и 44 Гц. Это обстоятельство свидетельствует о том, что, несмотря на возрастание коэффициента ослабления α в волноводном канале «Земля–ионосфера», с увеличением частоты увеличиваются и наблюдаемые поля, приведенные к одинаковым токам в антенне. Следовательно, коэффициент возбуждения СНЧ поля на частотах 82 и 188 Гц несколько выше, чем на частотах 33 и 44 Гц.

Регулярные данные о вариациях взаимноперпендикулярных E_z и H_z компонент СНЧ поля получены в 17 полусуточных сеансах на частотах 33, 82 и 188 Гц (204 часа синхронных записей). В каждом сеансе измерения начинались в 2 часа ночи местного времени (7 часовой пояс) и продолжались до 14 часов. В начале сеанса условия на трассе были ночными и после прохождения терминатора к концу сеанса – дневными. На рис. 5 (а, б, в) представлены вариации уровня E_z и H_z в зависимости от местного времени на частотах 33, 82 и 188 Гц. Уровень поля для каждой точки графиков на рис. 5 получен при усреднении четырех отсчетов амплитуды сигнала на диаграммной ленте. Обобщенные результаты представлены в табл. 3.

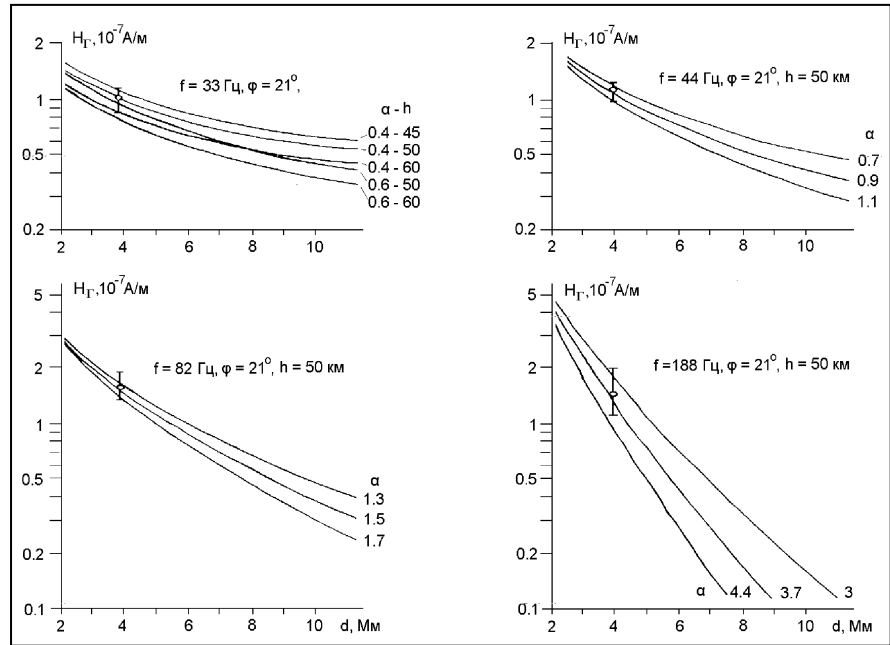


Рис. 4. Результаты расчетов и измерений H_z для однородного волновода.

Таблица 3.

№ сеанса	№ пункта наблюдения	Дата	f , Гц	$H_{\text{макс}}$, 10^{-7} А/м	$E_{\text{макс}}$, 10^{-7} В/м	H_z макс/мин	E_z макс/мин	R
1	1	11.08.85	33	1.9	1.8	1.65	1.54	0.87
2	2	12.08.85	33	1.9	0.3	1.60	1.57	0.61
3	3	13.08.85	33	1.9	1.5	1.78	1.58	0.94
4	4	14.08.85	33	1.9	0.9	1.54	1.34	0.90
5	5	15.08.85	33	1.6	1.7	2.04	2.01	0.99
6	6	16.08.85	33	1.7	1.4	1.29	1.33	0.92
8	6	18.08.85	82	1.9	1.9	1.25	1.24	0.65
9	5	19.08.85	82	2.4	3.2	1.27	1.26	0.91
10	4	20.08.85	82	2.4	1.6	1.28	1.28	0.98
11	3	21.08.85	82	2.5	2.1	1.35	1.31	0.86
*	*	08.09.84	82	1.8	4.7	1.23	1.2	0.98
15	2	25.08.85	188	2.2	0.5	1.88	1.88	0.99
16	7	26.08.85	188	2.1	3.7	3.13	2.25	0.99
17	3	27.08.85	188	2.3	2.8	1.99	1.78	0.99
18	4	28.08.85	188	2.1	2.3	2.02	2.09	0.97
19	5	29.08.85	188	1.9	3.7	1.65	1.62	0.97
20	6	30.08.85	188	1.9	2.6	2.33	2.37	0.96

Полученные экспериментальные данные о вариациях уровня E_z и H_z компонент поля сводятся, в основном, к следующему. Уровень поля в течение сеанса изменяется в пределах, значительно превышающих погрешности измерений. Максимальные вариации отмечены на частоте 188 Гц, для которой $H_{\text{макс}}/H_{\text{мин}}$ изменяется в пределах от 1.6 до 3.1. Прослеживается четкая закономерность – переход от высоких ночных уровней поля в начале каждого сеанса к низким дневным уровням происходит не монотонно. При приближении восхода Солнца в пункте измерения уровень поля падает, затем резко возрастает, достигая локального максимума через 1-1.5 часа после восхода. После этого вновь наблюдается спад до минимальных уровней, когда вся трасса оказывается в дневных условиях. Минимальные вариации поля отмечены на частоте 82 Гц, для которой $H_{\text{макс}}/H_{\text{мин}} = 1.3$. Переход от ночных условий к дневным происходит аналогично частоте 188 Гц, с той лишь разницей, что дневные и ночные уровни практически совпадают. На частоте 33 Гц дневной уровень поля уже превышает ночной, при этом заметна закономерная немонотонность перехода от ночных условий к дневным. Отношение $H_{\text{макс}}/H_{\text{мин}}$

изменяется в пределах 1.3-2, в среднем 1.7. Вариации E_z и H_z компонент поля происходят синхронно, коэффициент взаимной корреляции r изменяется от 0.61 до 0.99 и в 76% случаев выше 0.9.

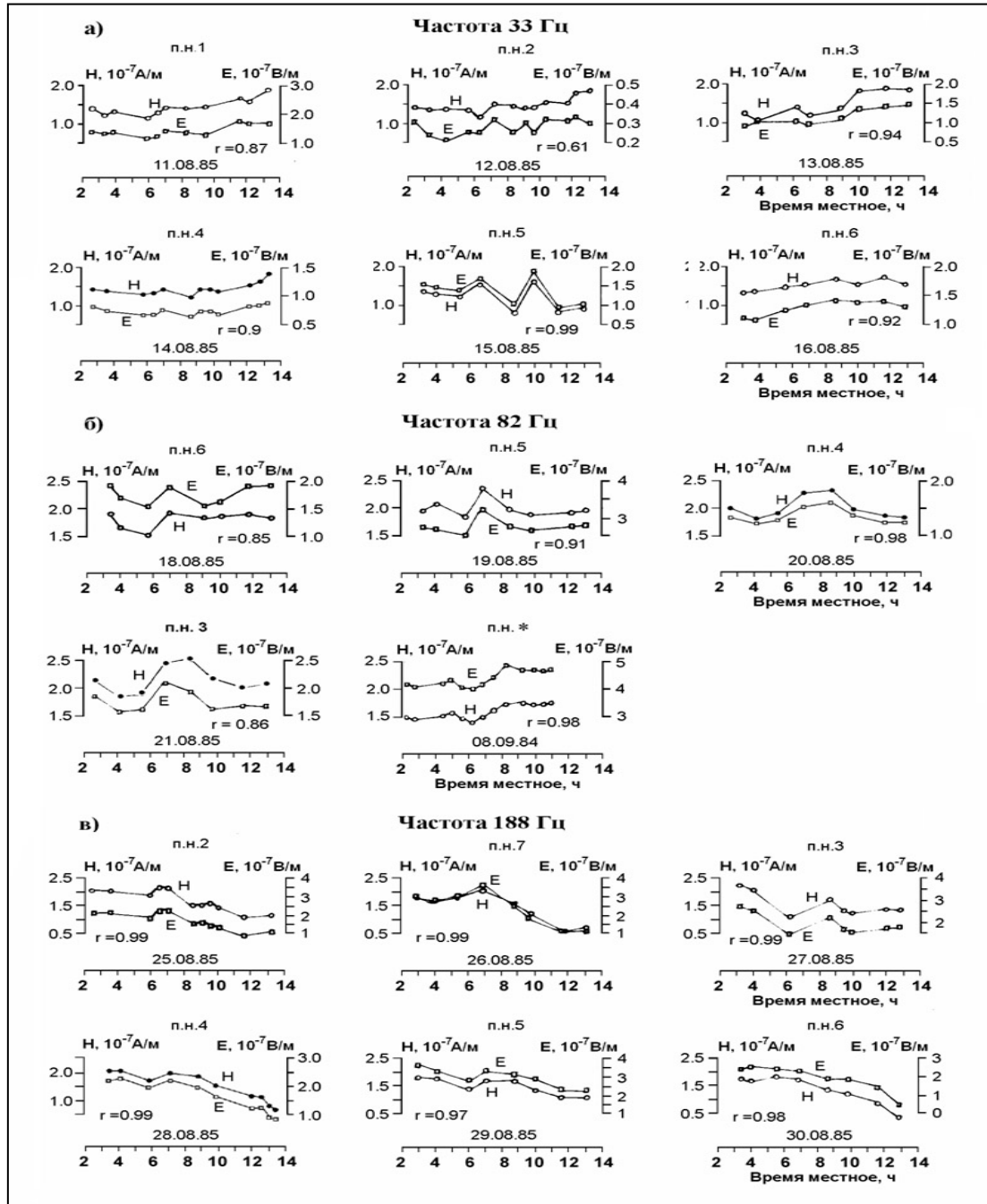


Рис. 5. Вариации H_z и E_z компонент СНЧ поля летом 1985 г.

Качественное объяснение немонокотным вариациям поля в период восхода может быть следующим. Угол между линией терминатора и дугой большого круга, соединяющей приемник и излучатель, составляет приблизительно 30° . Скользящее падение электромагнитной волны на протяженную неоднородность зоны перехода от ночи ко дню может дать значительные осцилляции из-за отражения и канализации энергии линией терминатора. В работе Е. Филда и Р. Джойнера [6] теоретически показана возможность таких сильных вариаций при наличии протяженных ионосферных неоднородностей. Полученные результаты экспериментально подтверждают расчеты, проведенные в работе [6].

Синхронно зарегистрированное отношение горизонтальных взаимноперпендикулярных компонент электрического E_z и магнитного H_z полей на границе раздела (поверхностный импеданс) с точностью до погрешности эксперимента сохраняется постоянным при значительных (до 3 раз) и немонокотных вариациях уровня поля, связанных с изменением условий возбуждения и распространения зондирующего поля, в том

числе положения линии терминатора относительно пункта приема. Следовательно, эксперименты дают основание сделать вывод о независимости измеренных значений импеданса (в пределах погрешности измерений) от значительных и немонотонных вариаций уровня зондирующего поля. С методической точки

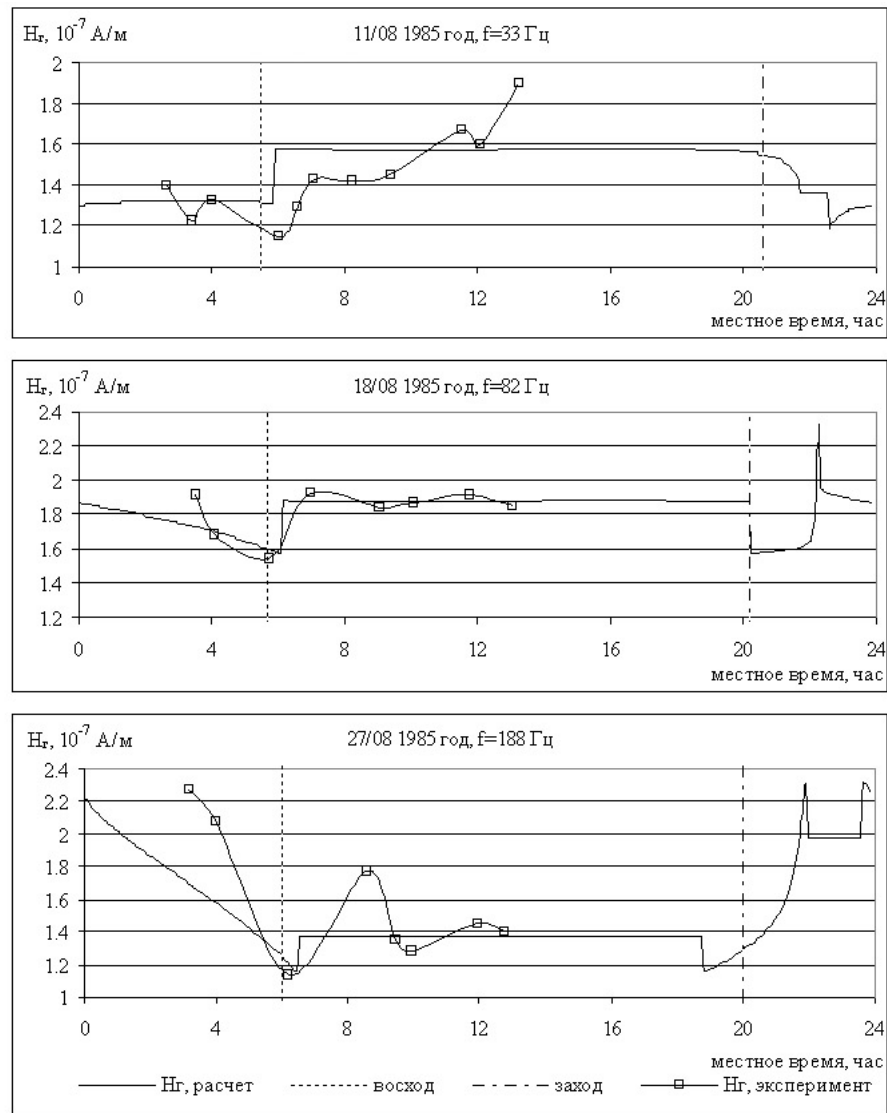


Рис. 6. Результаты сравнения расчетных и измеренных значений магнитной компоненты поля H_z .

зрения это следующее из теории свойство импеданса позволяет проводить его измерения в любое время суток.

Расчеты распространения СНЧ радиоволн выполнены также для модели неоднородного волновода «Земля-ионосфера». На рис. 6 представлены результаты сравнения измерений H_z и расчетов этой компоненты по программе, разработанной Ю.П. Галюком, В.Н. Копейкиным и В.К. Муштаком для расчетов электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в волноводе «Земля – ионосфера» с учетом нерегулярности типа «день – ночь». Программа позволяет по координатам источника и точки наблюдения, дате и времени суток, токовому моменту и ориентации излучателя, значениям проводимостей в месте излучения и приема вычислять компоненты электромагнитного поля в неоднородном волноводе типа «день-ночь». При расчетах использовались значения постоянных распространения в дневной и ночной областях, предложенные в работе [9]. Сила тока в антенне излучателя принималась равной 210 А на частотах 82 и 188 Гц и 245 А на частоте 33 Гц. Сравнение расчетных и измеренных значений H_z показывает также их неплохое соответствие. И для измерений, и для расчетов характерно, что на частоте 33 Гц дневные уровни поля выше ночных, на частоте 82 Гц дневные и ночные уровни поля практически совпадают, на частоте 188 Гц дневные уровни поля меньше ночных. Прослеживаются немонотонные вариации уровней H_z компоненты СНЧ поля в период восхода Солнца, обусловленные, главным

образом, прохождением радиоволны через протяженную неоднородность перехода от ночи ко дню [6]. Некоторые расхождения расчетных и измеренных значений могут быть обусловлены расположением передатчика за Полярным кругом, где в летнее время имеет место «полярный день».

В табл. 4 представлены результаты измерений электромагнитного поля и азимута источника (с 95%-ными доверительными интервалами), проведенных в течение суток 3-4 апреля 1988 г. в различных помеховых условиях в средней части акватории оз. Байкал на частоте 82 Гц.

Таблица 4.

Результаты СНЧ измерений на акватории оз. Байкал 3-4.04.1988 г.

Местное время, час	Число усреднений N	H_z , 10^{-7} А/м	E_z , 10^{-7} В/м	Азимут, град.
05:00	14	1.5 ± 0.09	...	—
11:30	16	1.38 ± 0.03	...	—
22:00	7	1.32 ± 0.10	...	26 ± 2
00:15	4	1.46 ± 0.04	...	29 ± 2
04:30	6	1.43 ± 0.05	...	31 ± 1
Среднее значение		1.42	...	29

Магнитная компонента H_z принималась датчиком (рис. 7), ориентированным максимум диаграммы направленности на источник -30° влево от северного магнитного полюса. Электрические компоненты $E_{в-з}$ и $E_{с-ю}$ принимались ортогональными приемными линиями одинаковой длины $l = 100$ м, ориентированными вдоль геомагнитной широты и долготы, что давало возможность определения направления прихода (пеленга) СНЧ радиоволны. Направление прихода волны определяется в среднем в 29° влево от севера и, в пределах погрешности измерений, хорошо согласуется с известным направлением на источник -30° .

Таким образом, с помощью системы взаимно-перпендикулярных симметричных приемных антенн E_z возможно достаточно точное определение пеленга на источник СНЧ излучения. Этот способ пеленгации является новым не только по диапазону принимаемых частот, но и по использованию симметричных антенн для приема горизонтальной (тангенциальной) компоненты E_z электромагнитного поля. Приемный комплекс E_z и H_z компонент при постоянной фазировке датчиков поля позволяет также определять квадрант прихода электромагнитного поля.

Заключение

С помощью разработанного авторами мобильного высокочувствительного измерительного СНЧ комплекса для синхронного приема электрического и магнитного полей на границе раздела "воздух-земля" исследованы пространственно-энергетические, временные и поляризационные характеристики СНЧ электромагнитного поля на трассе длиной около 4000 км. Получено хорошее количественное совпадение расчетных данных с результатами измерений. Выявлены закономерные немонотонные изменения уровня СНЧ поля, связанные с линией терминатора. Показано, что отношение взаимно перпендикулярных

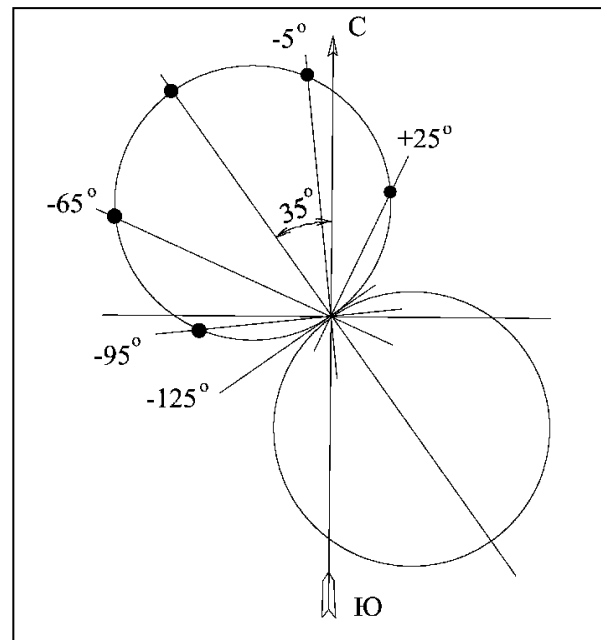


Рис. 7. Диаграмма направленности магнитоиндукционного датчика.

компонент электрического E_z и магнитного H_z полей на границе раздела «воздух-земля» с точностью до погрешности эксперимента сохраняется постоянным при значительных вариациях зондирующего поля.

Авторы выражают благодарность Л.А. Собчакову, Л.Б. Песину, А.С. Панфилову, В.И. Агапону, И.А. Скокову, В.Е. Пониматкину, обслуживающему персоналу «Зевса» за представленную возможность экспериментального исследования условий распространения СНЧ радиоволн с помощью уникальной радиоустановки «Зевс».

Список литературы

1. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Глубинное радиоимпедансное зондирование земной коры с использованием электромагнитного поля СНЧ радиоустановки // Физика Земли. 2001, №2, с. 157–165.
2. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н. и др. Глубинные электромагнитные исследования с применением мощных сверхнизкочастотных радиоустановок // Физика Земли. 1998, №8, с. 3–22.
3. Рязанцев А.М. Теоретические и экспериментальные результаты изучения распространения радиоволн СНЧ-диапазона в волноводе «Земля-ионосфера» (обзор) // ЦООНТИ «Экос». – М., 1982. 28 с.
4. Способ и устройство для измерения поверхностного импеданса. Авторское свидетельство № 299005, 01.08.1989 г.
5. Bannister P.R. The determination of representative ionospheric conductivity parameters for ELF propagation in the earth-ionosphere waveguide // Radio Sci., 1985. Vol. 20. No 4. p. 977.
6. Field E.C., Joiner R.G. Effects of lateral ionospheric gradients on ELF propagation // Radio Sci. –1979. –V. 14, N 6. –p. 1057–1068.
7. Fullekrug M., Fraser-Smith A.C. // Geoph. Res. Let., Vol. 23, No. 20, pp. 2773–2776, October 1, 1996.
8. Galeys J. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves. –N.Y.: Pergamon Press, 1972. 362 p.
9. Greifinger C., Greifinger P. Approximate method for determining ELF eigenvalues in the Earth-Ionosphere waveguide // Radio Sci. –1978. –V.13, №5. –p. 831–837.
10. Special issue on extremely low frequency (ELF) // IEEE Trans. On Communications. –1974. –Com 22, № 4. p. 1–156.

Электропроводность земной коры в районе СНЧ-антенны «Зевс» по результатам электромагнитных зондирований на постоянном и переменном токе (Мурманский блок)

А.А. Жамалетдинов

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты.

Введение

Мурманский блок представляет собой монотонную в геологическом отношении провинцию, сложенную древнейшими гранито-гнейсовыми породами ниажнеархейского возраста [2]. Территория отличается практически полным отсутствием рудоперспективных проводящих объектов и средним высоким электрическим сопротивлением в десятки тысяч Ом·метров. Именно эта его особенность привлекла внимание связистов при выборе территории для размещения радиопередающей антенны сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения «Зевс» в полосе частот 20-200 Гц. Известно, что эффективность работы заземленной СНЧ антенны на излучение определяется, прежде всего, параметрами подстилающего полупространства [19]. Чем выше сопротивление основания, тем на большую глубину проникает возвратный ток и тем больше эффективная площадь излучающей рамки – горизонтального магнитного диполя. С целью выбора площадки для размещения СНЧ антенны на территории Мурманского блока проводились наземные и воздушные электроразведочные работы силами геологического факультета Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) государственного университета (профессора А.В. Вешев и А.С. Семенов, доцент А.В. Яковлев). Наземные работы проводились на постоянном токе методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Результаты работ подтвердили первоначальные предпосылки об однородном строении массива и высоком сопротивлении пород (10 тысяч Ом·метров и выше). Антенна «Зевс», представляющая собой две параллельные заземленные линии электропередачи длиной 50-60 км, была сооружена [6]. Однако, в последующие годы появился ряд публикаций, указывающих на существенную электрическую неоднородность строения Мурманского блока. В работе [3] на основании аудиоманнитотеллурических (АМТ) и магнитотеллурических (МТ) зондирований, выполненных в районе поселков Териберка, Дальние Зеленцы и на дороге Кола-Серебрянка указывается на наличие на территории Мурманского блока, на относительно небольшой глубине 10 км промежуточного проводящего слоя с продольной проводимостью порядка 30-50 См и с удельным сопротивлением пород порядка 100 Ом. По результатам низкочастотных геомагнитных наблюдений в поле контролируемого источника (СНЧ-антенны Зевс) установлен проводящий слой в земной коре и выявлена система проводящих разломов с сопротивлением порядка 1 Ом, пересекающих кабельную линию антенны «Зевс». В настоящей статье, с целью получения более полной картины о характере электропроводности Мурманского блока, приведен анализ и интерпретация результатов ранее выполненных работ на постоянном и переменном токе, проводившихся с участием автора методами электрического зондирования и профилирования.

Район работ и методика наблюдений

Район расположения СНЧ-антенны «Зевс» занимает северо-западную часть Мурманского блока, сложенного древнейшими гранитоидными породами (рис.1).

В нем выделяются три основные разновидности породных ассоциаций, составляющих крупные блоки - мигматит-плагиигранитов, габбро-диорит чарнокитов и мигматит-плагии-микроклиновых гранитов. В целом эта территория представляет собой выход древнейшего нижне-архейского фундамента. Он отделен от Центрально-Кольской серии гнейсов граувакко-порфирит-диабазовыми сланцами северо-западного продолжения зоны Колмозеро-Воронья. На рис. 1 юго-западная граница Мурманского блока отмечена штрих-пунктирной линией.

Схема расположения пунктов и трасс зондирований на постоянном токе, выполненных в районе источника «Зевс» на Мурманском блоке, приведена на рис. 2.

Первые зондирования на Мурманском блоке выполнялись А.В. Яковлевым (Ленинградский университет) с установками ВЭЗ с разносами АВ от 1-2 до 15-16 км. Обобщение этих измерений выполнено в работе [18]. Положение одной из установок ВЭЗ с разном АВ=16 км показано на рис. 2б. В работе [9] описаны результаты глубинных

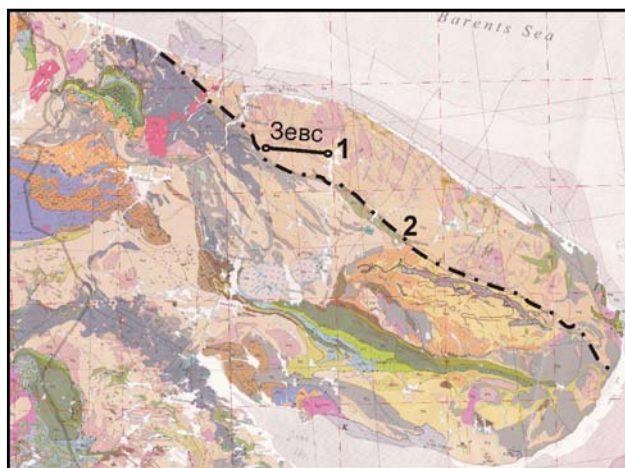


Рис. 1. Положение СНЧ-антенны «Зевс» (1) на геологической схеме Кольского п-ва по данным [Митрофанов, 1996]. Штрих-пунктиром (2) показана юго-западная граница Мурманского блока

зондирований на территории Мурманского блока с импульсным МГД-источником «Хибины», приведенные к режиму постоянного тока (точки 1а-3а на рис. 2).

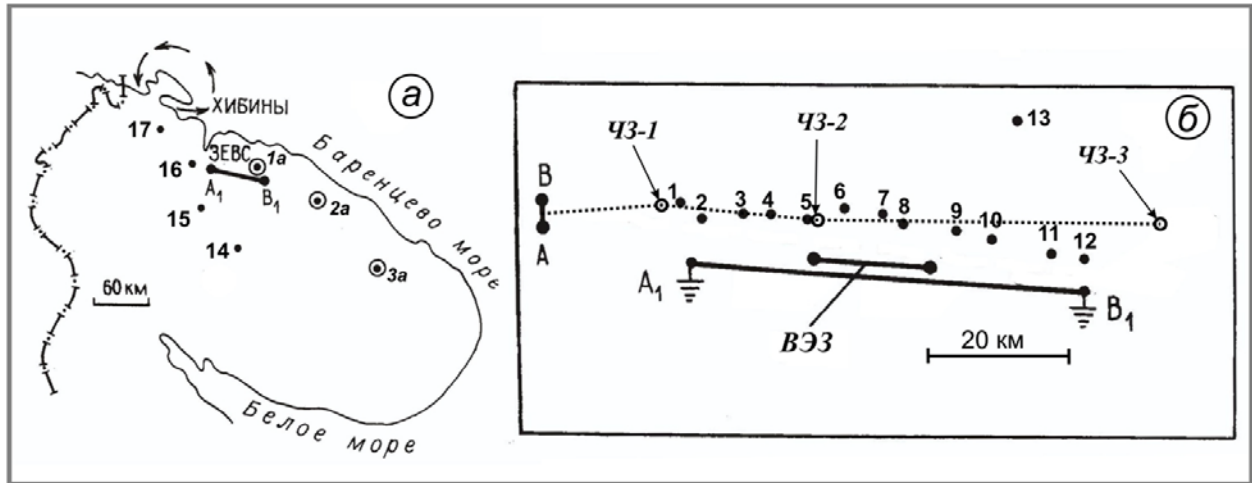


Рис. 2. Схема расположения питающих и приемных линий дистанционного зондирования на постоянном токе и частотного зондирования в окрестности СНЧ-антенны «Зевс».

1а, 2а, 3а – пункты зондирования в поле МГД-источника «Хибины», 1-17 – точки зондирования на постоянном токе в поле антенны «Зевс» (линия А1-В1), АВ – питающая линия, пунктир – трасса частотного зондирования, ЧЗ-1, ЧЗ-2, ЧЗ-3 пункты частотных зондирований, ВЭЗ – установка зондирования ВЭЗ с АВ=16 км.

Рабочие разности достигали 350 км. При расчетах принято, что ток заводненного источника «Хибины» стекает со всей поверхности заливов по разные стороны полуостровов Средний и Рыбачий (рис. 2а). Заливы при этом рассматривались как неэквипотенциальные заземлители (электроды). Проходя по заливам, ток испытывает сопротивление морской воды и частично ответвляется в морское дно. Доля этого тока определяется распределением потенциала в морской воде и сопротивлением морского дна. Схема расчетов приведена в работе [10].

Результаты частотных зондирований

На рис. 2 показано положение питающей линии АВ, использовавшейся в 1986 году для частотного зондирования вдоль дороги Кола-Серебрянка в частотном диапазоне от 1 Гц до 0.5 кГц [11]. Кривые кажущегося сопротивления по результатам зондирования приведены на рис. 3.

Пунктирными линиями на рис. 3 показаны эффективные кривые зондирования, исправленные за влияние ближней зоны по методике [5]. На разnose 16 км (точка ЧЗ-1) наблюдается двухслойный разрез с сопротивлением подстилающего основания (кристаллического фундамента) порядка $3 \cdot 10^5$ Ом·м. На разnose 39 км (точка ЧЗ-2) наблюдается трехслойная кривая типа «К» с проводящим слоем, формально залегающим на глубине 10 км. Кажущееся сопротивление с понижением частоты опускается до $5 \cdot 10^3$ Ом·м. Сопоставление с геологической схемой, приведенной на рис.1, показывает, что в данном случае проявилось влияние Чудъявского разлома. Высокая электропроводность пород в зоне разлома объясняется широким развитием здесь процессов

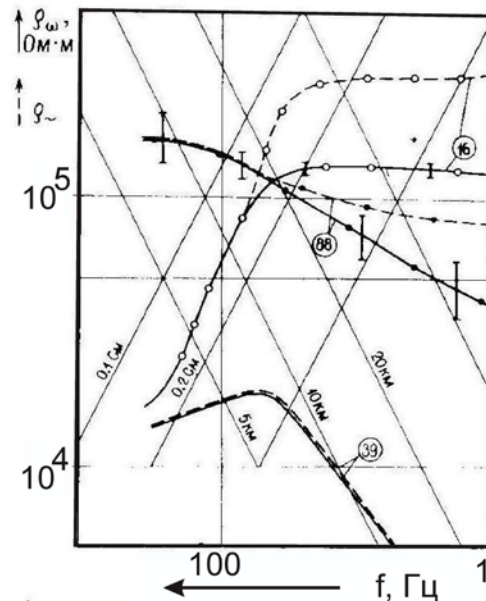


Рис. 3. Результаты частотного зондирования на Мурманском блоке. Положение трасс на рис. 2.

Сплошными линиями показаны измеренные кривые ρ_{ω} , штриховыми – кривые $\tilde{\rho}$, исправленные за влияние ближней зоны

милонитизации и рассланцевания пород, сопровождающихся проявлением сульфидной (пирит-пирротиновой) минерализации. При дальнейшем увеличении разноса до 88 км (точка ЧЗ-3) кривая частотного зондирования снова приобретает вид двухслойной кривой с сопротивлением основания порядка $9 \cdot 10^4$ Ом·м. Полученные результаты частотного зондирования указывают на высокое среднее сопротивление Мурманского блока и наличие зоны Чудзъяврского разлома сопротивлением в первые тысячи омметров. Зона разлома имеет приповерхностное распространение, поскольку ее экранирующее влияние имеет ограниченное распространение.

Методика зондирований на постоянном токе

Основной объем зондирований на Мурманском блоке выполнен на постоянном токе с установками ВЭЗ [18] и с использованием питающего кабеля СНЧ-антенны «Зевс» (точки 1-17 на рис. 2). Зондирования выполнялись путем подключения к антенне «Зевс» генераторной станции ЭРС-67 мощностью 29 кВт. Использовались периодические квазипрямоугольные сигналы тока периодом 8 с. Генератор ЭРС-67 подключался непосредственно к выводам ЛЭП на заземления АВ, минуя согласующие устройства (продольные емкости). Сила тока при этом составляла в среднем 45-50 А.

Измерения проводились с применением двух взаимно ортогональных приемных линий MN , ориентированных по магнитной широте (E_x) и по меридиану (E_y). Такие измерения называются векторными. Они позволяют определять модуль полного вектора и его направление φ при условии, если известна полярность импульсов включения тока. Если полярность неизвестна, то производят третье измерение с диагональным расположением приемной линии.

Измерения сигналов в режиме дистанционного зондирования осуществлялись с использованием 6-компонентных станций ЦАИС [1]. Измерялись компоненты E_x, E_y, H_x, H_y, H_z . Кроме того, регистрировалась "диагональная" компонента электрического поля путем подключения дальних заземлений Г-образной установки к шестому каналу "U". Это позволяло определять направление вектора полного горизонтального электрического поля. Векторные характеристики поля, в свою очередь позволяли делать заключение о степени влияния горизонтальной неоднородности среды. Применение диагональных измерений было возможно, благодаря гальванической развязке всех трех электрических каналов в станции ЦАИС. Длина линий MN изменялась от 100 до 500 м.

Измерения сигналов выполнялись с частотой дискретизации 15 отсчетов в секунду. Каждый сеанс записи длился от 5 до 30 минут, в зависимости от соотношения «сигнал-шум». Длительные записи (30 мин.) применялись в тех случаях, когда визуально сигнал не просматривался

Методика обработки зондирований на постоянном токе.

При проведении глубинных зондирований на постоянном токе с длинными заземленными линиями AB (с промышленными ЛЭП) измерения выполняют путем последовательного удаления приемной установки от одного из заземлений в любом доступном по условиям дорог направлении. При этом схема установки изменяется от трехэлектродной градиентной вблизи заземлений до четырех электродной и затем дипольной по мере удаления от питающей линии. Модуль полного вектора напряженности электрического поля

$\left| \vec{E}_{теор} \right| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ для установки зондирования с длинной заземленной линией определяется выражением

$$\left| \vec{E}_{теор} \right| = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \left[r_A^{-4} + r_B^{-4} - \frac{r_A^2 + r_B^2 - l_{AB}^2}{(r_A \cdot r_B)^3} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где l_{AB} – длина линии AB , r_A и r_B – расстояния от точки наблюдения до заземлений A и B , соответственно. Обратная величина выражения (1) при $\rho = I = 1$ используется в качестве геометрического коэффициента k

при вычислении кажущегося сопротивления по формуле $\rho_k = k \cdot \frac{|\vec{E}| \cdot l_{MN}}{I}$.

Эффективное (действующее) расстояние $\tilde{r}$, аналогичное $AB/2$ в методе ВЭЗ, определяется по эмпирической формуле

$$\tilde{r} = r_A + 0.5 \cdot (r_B - r_A) \cdot \left(\frac{r_A}{r_B} \right)^2, \quad (2)$$

где $r_A \leq r_B$. В случае $r_A > r_B$ значения r_A и r_B меняются местами в выражении 3.9.

Поскольку зондирования в поле антенны «Зевс» осуществлялись с установками произвольной конфигурации и с произвольным расположением приемных линий (в зависимости от сети дорог), то обратная задача решалась путем сопоставления экспериментальных кривых зондирования с теоретическими кривыми для заданной расстановки питающих и приемных заземлений и для принятой схемы определения эффективного разноса (уравнения 1, 2). При этом за основу принимался модуль полного вектора электрического поля, менее всего подверженный влиянию приповерхностных локальных неоднородностей.

Оценка соответствия экспериментальных данных условиям принятой одномерной модели строения среды осуществлялась по векторным характеристикам поля. В качестве такой меры принят угол $\beta = \alpha - \varphi$ между направлением полного вектора измеренного поля и теоретическим направлением вектора $\alpha = \arctg \frac{E_y^{\text{экспер}}}{E_x^{\text{экспер}}}$ и

$\varphi = \arctg \frac{E_y^{\text{теор}}}{E_x^{\text{теор}}}$, соответственно, для модели однородного полупространства.

Экспериментальные значения компонент E_y и E_x определялись путем проведения измерений вдоль магнитной широты (E_y) и вдоль магнитного меридиана (E_x). Поскольку линия АВ антенны «Зевс» направлена практически по магнитной широте, то в условиях однородного полупространства измеренные компоненты соответствовали проекциям полного вектора $\vec{E}$ на направления вдоль линии АВ и ортогонально ей. Значения проекций ($E_x^{\text{теор}}$) и ($E_y^{\text{теор}}$) рассчитывались теоретически по формулам для однородного полупространства. Отклонения экспериментальных направлений поля от теоретически рассчитываемых связывались с проявлениями неоднородности среды.

Обработка данных проводилась на персональном компьютере «КОМПАИ-АТ-ТУРБО», установленном в базовом лагере. Результирующие записи представляли собой отклик среды, осложненный высокочастотными помехами и длиннопериодным трендом. Процедура обработки включала следующие этапы:

1. Визуальный просмотр записей в аналоговом виде для выделения участков, наименее искаженных резкими изменениями интенсивности помех,
2. Устранение ураганных "выбросов",
3. Устранение низкочастотного тренда и
4. Накопление.

Накопление выполнялось по двум периодам сигнала с шагом в один период. Это позволяло не терять полезную информацию и, в то же время, сохранять возможность просмотра полного периода в условиях, когда точное время начала сигнала неизвестно.

При длительности регистрации 30 мин число полных периодов изменения тока с частотой 0.125 Гц составляет 225. Это означает, что в условиях стационарной помехи удавалось повышать соотношение "сигнал-помеха" в 15 раз, или, что то же, повышать силу тока от 50 А до 750 А в одиночном импульсе.

Интерпретация результатов зондирований на постоянном токе

Результаты обработки зондирований, выполненных на постоянном токе в районе СНЧ-антенны «Зевс» представлены в виде таблицы 1. Значения кажущегося сопротивления приведены по мере роста разносов. Первые в таблице номера точек от 1 до 17 приведены по результатам ВЭЗ в порядке роста разносов АВ/2. Дальнейшая нумерация точек зондирования в первом и четвертом столбцах таблицы, показанная жирным шрифтом, приведена в соответствии с точками зондирования, выполненных в поле антенн «Зевс» и «Хибины», показанных на рис. 2. Результаты наблюдений в поле источника «Зевс» по дороге Кола-Серебрянка приведены на рис. 4 в виде графика профилирования.

Таблица 1.

**Значения кажущегося сопротивления по результатам зондирований на постоянном токе
в окрестности СНЧ-антенны «Зевс».**

№ точки	Разнос, км	Рока, кОм·м	Тип АВ	№ точки	Разнос, км	Рока, кОм·м	Тип АВ
1	0.001	9	«ВЭЗ»	11	7.3	20	«Зевс»
2	0.002	10	«-»	3	10.8	28	«-»
3	0.003	20	«-»	4	14.1	43	«-»
4	0.005	15	«-»	10	16.9	12.4	«-»
5	0.01	10	«-»	5	18.5	19	«-»
6	0.015	9	«-»	1	21.8	34	«-»
7	0.025	5	«-»	9	22.5	10.4	«-»
8	0.04	3	«-»	6	25.3	24	«-»
9	0.06	2.5	«-»	8	28.7	12	«-»
10	0.12	2.5	«-»	7	28.8	43	«-»
11	0.2	3	«-»	13	29.8	23	«-»
12	0.5	5	«-»	16	35.8	25	«-»
13	0.7	8	«-»	17	52.4	46	«-»
14	1.5	10	«-»	14	92.1	58	«-»
15	2.5	13	«-»	15	92.7	43	«-»
16	5	18	«-»	1a	110	93	«Хибины»
17	8	22	«-»	2a	250	70	«-»
12	5	20	«Зевс»	3a	350	45	«-»
2	6.8	27	«-»				

На рис. 4 видно, что наиболее низкими значениями кажущегося сопротивления отмечается блок мигматит-плагиигранитов (точки 8, 9, 10). Резкие изменения значений ρ_k приурочиваются к зонам разломов. Один из них наблюдается над зоной оруденения, приуроченной к Чудзъяврскому разлому (точка 5), влияние которого отмечено также на результатах частотного зондирования (рис. 3). В целом можно отметить, что на всем пространстве между заземлениями А1-В1 антенны «Зевс» величины кажущегося сопротивления изменяются незначительно – от 10^4 до $4 \cdot 10^4$ Ом·м.

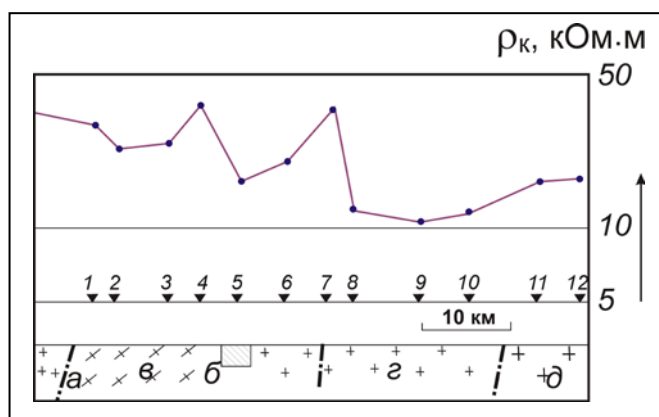


Рис. 4. График кажущегося сопротивления по результатам измерений в поле антенны «Зевс». Положение точек 1-12 показано на рис. 2.

Легенда: а - контакты,
б – зона оруденения,
в–габбро-диорит-чарнокиты;
г – мигматит-плагииграниты
д – мигматит-плагиигранитовые граниты

Ниже, на рис. 5 приведен план векторов полного горизонтального электрического поля по результатам экспериментальных наблюдений в поле антенны «Зевс» (сплошные стрелки); и по данным теоретических расчетов для модели однородного полупространства (штриховые стрелки). Длина теоретических векторов принята за единицу, относительно которой отнормированы длины экспериментальных векторов.

Общее рассмотрение рис. 5 указывает на удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных. Это, в свою очередь, свидетельствует об отсутствии в районе линии А1В1 (антенны «Зевс») крупных

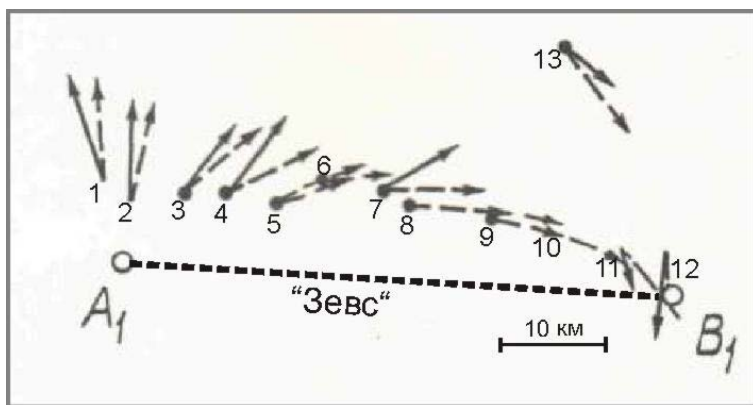


Рис. 5. План векторов полного горизонтального электрического поля на постоянном токе по результатам экспериментальных наблюдений в поле СНЧ-антенны «Зевс» (сплошные стрелки) и по данным теоретических расчетов (штриховые стрелки). Цифрами указаны номера точек показанных на рис. 2.

нарушений горизонтальной неоднородности, которые могли бы существенно изменить структуру поля, как это наблюдается, например, вблизи проводящих зон Печенгской или Имандра-Варзугской структур.

Результаты измерений поля антенны «Зевс» вдоль дороги Кола-Серебрянка, представленные на рис. 4 в виде графика электропрофилирования на постоянном токе, приведены ниже, на рис. 6 в форме графика ρ_k вертикального электрического зондирования.

При подсчетах ρ_k и действующего разноса зондирования $r_{эфф}$, использованы подходы, описанные выше (уравнения 1 и 2).

На рис. 6, прежде всего, выделяется область пониженных значений кажущегося сопротивления (до 10-20 тыс. Ом·м на фоне 30-40 тыс. Ом·м) в диапазоне средних разносов 15-30 км. Сугубо формально эти понижения можно было бы связать с наличием проводящего слоя на глубине. Однако, сопоставление с рисунками 3 и 4, описанными выше, позволяет однозначно связать понижения ρ_k с влиянием эффекта электропрофилирования на кривую зондирования. Исходя из рисунков 4 и 5, учитывая высокую изрезанность кривой зондирования, можно заключить, что объекты, вызывающие понижения ρ_k на рис. 6, имеют приповерхностное происхождение и могут быть исключены в дальнейшем из рассмотрения при анализе результатов глубинного зондирования.

Наряду с этим следует отметить, что само проявление резкой электрической неоднородности разреза представляет интерес при истолковании природы дилатантно-диффузионной проводимости горных пород на глубине. Можно полагать, что наблюдаемые на рис. 4 элементы мелкой тектоники (зоны контактов, трещиноватости и разломов), проявляющиеся в виде резких понижений ρ_k , прослеживаются на глубину вместе с содержащейся в них влагой и постепенно выполаживаются с глубиной под действием тангенциальных (горизонтальных) напряжений в земной коре [7]. При частотных зондированиях они проявляются в виде едва заметного промежуточного проводящего слоя дилатантно-диффузионной природы («слоя ДД») с продольной проводимостью порядка 1 См на глубинах от 2-3 до 7-10 километров [13, 8].

Вдоль линии расположения СНЧ-антенны «Зевс» А.В.Яковлевым с сотрудниками в предыдущие годы были выполнены симметричные зондирования по схеме ВЭЗ с разносами АВ до 15-16 км. Обобщение этих

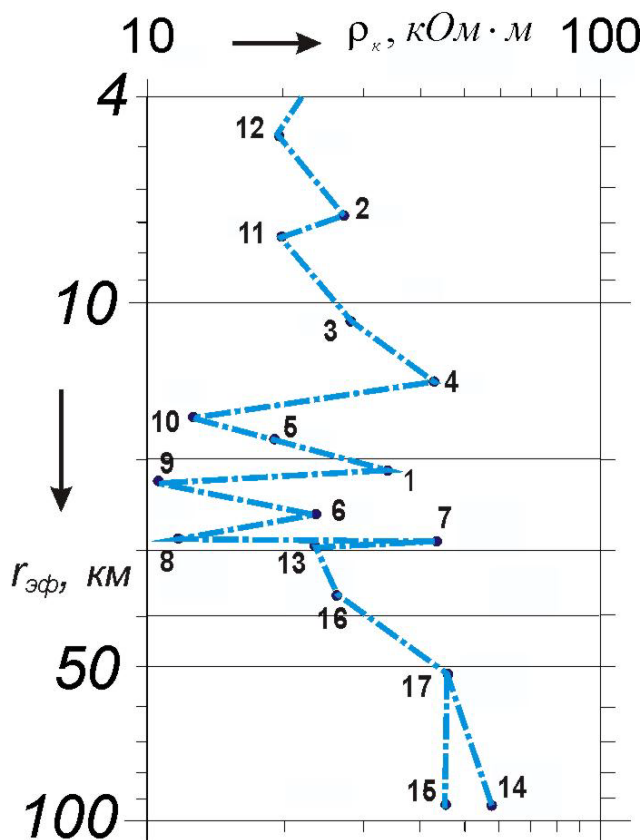


Рис. 6. Результаты вертикального электрического зондирования на постоянном токе в поле антенны «Зевс». Нумерация точек соответствует Рис.2.

данных приведено в работе [Семенов, 1978]. Одна из полученных им кривых ВЭЗ с разномом до 16 км приведена в верхней части рисунка 7а в составе сводной кривой зондирования совместно с результатами наблюдений в поле СНЧ антенны «Зевс» (рис. 6) и с результатами зондирования на постоянном токе в поле МГД-источника «Хибины» [9]. Положение установки ВЭЗ показано на рис. 2. Полученная сводная кривая кажущегося сопротивления охватывает диапазон разномов от единиц метров до первых сотен километров (рис. 7а). Данные ВЭЗ занимают верхнюю часть рисунка 7а до разномы $AB/2 = 8$ км. Далее, в диапазоне разномов 5-92 км следуют результаты зондирований в поле источника «Зевс». Сюда же следует отнести

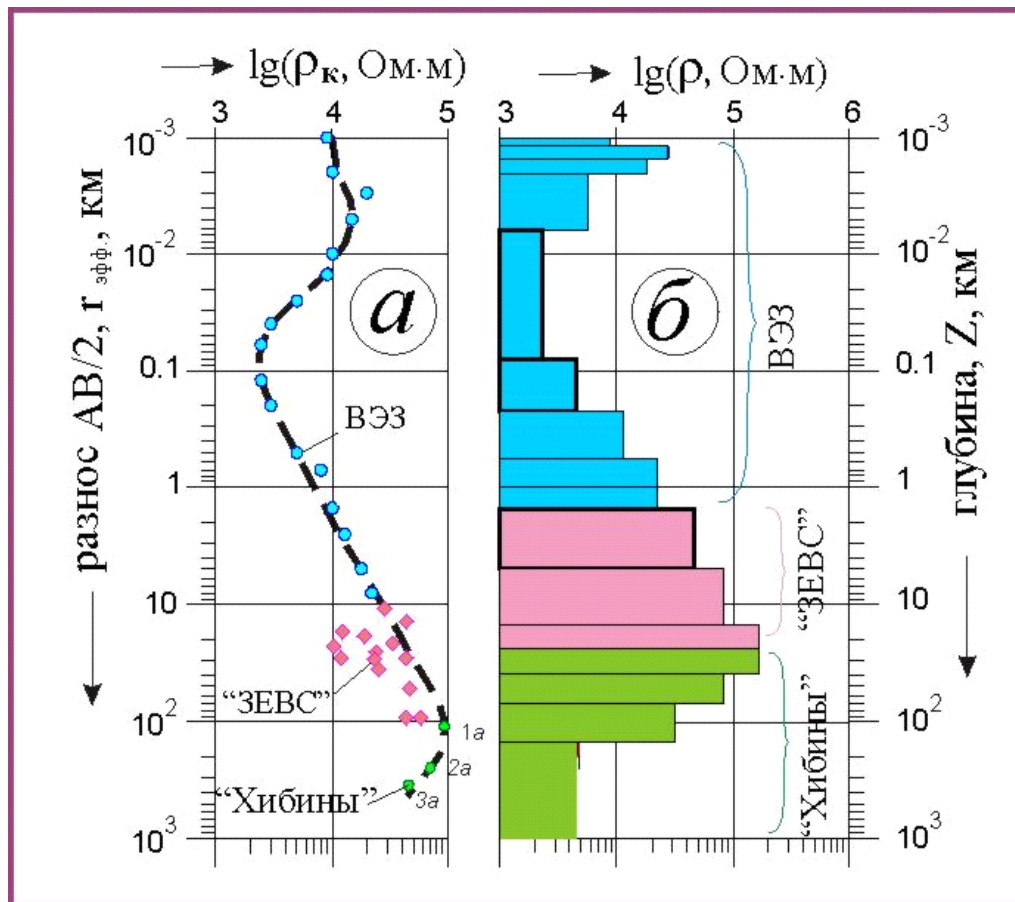


Рис. 7. Сводная кривая зондирований на постоянном токе в районе СНЧ-антенны «Зевс» (а) и разрез по результатам решения обратной задачи (б).

Положение точек МГД-зондирований 1а, 2а и 3а, а также положение трассы ВЭЗ показано на рис. 2. Точки зондирования с источником «Зевс» на разносах от 5 до 92 км показаны на рис. 6, их положение показано на рис. 2.

результаты частотного зондирования (рис. 3), показывающие на разноте 88 км эффективное (приведенное к постоянному току) значение кажущегося сопротивления порядка 90 тысяч Ом·м. И наконец, в диапазоне разномов 110-350 км располагаются результаты зондирования в поле МГД-источника «Хибины» (точки 1а, 2а, 3а). Положение пунктов регистрации показано на рис. 2, значения кажущегося сопротивления и разномы приведены выше в таблице 1.

Результаты решения обратной задачи на основе сводной кривой кажущегося сопротивления, приведено на рис. 7б в виде геоэлектрического разреза. В верхней части разреза выделяется сухая морена мощностью 4 м и сопротивлением порядка 25 тыс. Ом. Ниже залегает обводненная морена сопротивлением в единицы Ом·метров. Морену подстилают кристаллические породы, верхняя часть которых, сильно трещиноватая и обводненная, имеет низкое сопротивление (2-5 тыс. Ом). Ниже глубины 200 -300 м залегают плотные кристаллические породы сопротивлением 12-30 тыс. Ом. Далее с глубиной сопротивление кристаллических пород градиентно возрастает вплоть до глубины 20-30 км, где оно достигает значения в 200 тыс. Ом·м.

Плавный рост сопротивления с глубиной, очевидно, связан с понижением пористости и трещиноватости пород и соответствующим понижением содержания в породах влаги [17]. Если исключить из внимания область резких перепадов кажущегося сопротивления в диапазоне разномов 15-35 км, то можно заключить, что

глубинный разрез характеризуется наличием плохо проводящей части земной коры мощностью 25-30 км и сопротивлением 200 тыс. Ом, которая ниже сменяется постепенным спадом кажущегося сопротивления до 5 тыс. Ом на глубине 100-150 км под действием возрастающей с глубиной температуры. Наиболее резкий, скачкообразный рост сопротивления отмечается на глубине порядка 12-15 км.

Дискуссия

Наиболее дискуссионным и в то же время наиболее значительным в представленной работе является вывод о высоком сопротивлении земной коры, которое понижается лишь, начиная с глубины 25-30 км. Дискуссионность этого результата определяется тем, что характер глубинного геоэлектрического разреза на рис. 7 принципиально расходится с данными аудиоманнитотеллурических и магнитотеллурических зондирований (АМТ-МТЗ) для Мурманского блока, представленными в работах [3, 15, 14]. Согласно этим данным земная кора на территории Мурманского блока характеризуется наличием промежуточного проводящего слоя сопротивлением порядка 100 Ом на глубине 10-15 км. Это почти в тысячу раз расходится с результатами зондирований на постоянном токе, показывающими на той же глубине сопротивление порядка ста тысяч Ом-метров (рис. 6). Ниже 20-30 км сопротивление земной коры по данным АМТ-МТЗ повышается до 10^4 Ом-м и затем, с глубины 40-70 км наблюдается новое понижение сопротивления. На кривой зондирования постоянным током градиентное понижение сопротивления начинается с глубины 20-30 км.

Объективности ради заметим, что интерпретация результатов зондирований на постоянном токе (рис. 7) выполнена нами в рамках одномерной модели, без учета влияния береговой линии Баренцева моря. Вполне возможно, что влияние тонкой пленки хорошо проводящей морской воды с продольной проводимостью до 1000 См вызывает понижение кажущегося сопротивления, наблюдаемое на разносах 110-350 км. Поскольку трасса зондирования ориентирована продольно (параллельно) относительно береговой линии моря, то можно полагать, что влияние морского бассейна может только понизить значения кажущегося сопротивления. В этом случае, если убрать влияние моря, то максимум кривой зондирования станет более широким и мощность плохо проводящей толщи земной коры только увеличится. Тем самым наличие проводящего слоя на глубине 10 км станет еще более проблематичным. Отмеченные замечания не снимают необходимости выполнения АМТ-зондирований в районе СНЧ-антенны «Зевс» и проведения более полной интерпретации зондирований на постоянном токе с применением программ двухмерного и трехмерного численного моделирования.

Выводы

1. Выполнен анализ и интерпретация результатов площадных наблюдений на переменном и постоянном токе и сделан вывод о том, что кристаллические горные породы Мурманского блока в районе антенны «Зевс» характеризуется относительно однородным высоким сопротивлением с колебаниями значений удельного электрического сопротивления в пределах от 10^4 до $4 \cdot 10^4$ Ом-м, что характерно и для других кристаллических щитов [Jones, 2013].

2. На фоне высокого сопротивления наблюдаются зоны повышенной электропроводности, связываемые с разломной тектоникой. Но их влияние носит приповерхностный характер и ограничивается локальными понижениями сопротивления до первых тысяч ом.метров.

3. Составлена сводная кривая глубинного электрического зондирования на постоянном токе для Мурманского блока в диапазоне разносов от единиц метров до 350 км и проведена одномерная интерпретация полученных данных.

3. Глубинный разрез земной коры в районе Мурманского блока характеризуется градиентным ростом удельного электрического сопротивления от первых десятков тысяч Ом-метров в приповерхностной зоне до 200 тысяч Ом-метров на глубине 20-30 км. Далее наблюдается градиентный спад сопротивления до 5 тысяч Ом-метров на глубине порядка 100-150 км.

4. Наиболее резкий, скачкообразный рост сопротивления отмечается на глубине порядка 12-15 км.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-05-12044-офи-м). Автор выражает благодарность А.Д. Токареву, А.Н. Шевцову, Ю.А. Виноградову, В.Э. Асмингу, В.М. Гуревичу и А.Г. Ямпольскому за участие в полевых работах и обработке данных. Особую признательность автор выражает Т.Г. Коротковой за помощь в расчетах и в оформлении статьи.

Список литературы

1. Аскеров Э.Н., Багданкис Н.И., Багдасарова Н.Ю., Борисоглебский В.С., Букреев В.С., Жукаев Ю.В., Лисин А.С., Ковальчук Н.В., Колесник В.Е., Князев В.Н., Корневский Л.Н., Одинцов В.И., Перунов Б.С., Усеинов С.З. Цифровая автоматическая измерительная станция ЦАИС. // Геофизическая аппаратура. 1989. Вып. 91. С. 3-12.

2. Батиева И.Д., Бельков И.В., Ветрин В.Р., Виноградов А.Н., Виноградова Г.В. Гранитоидные формации докембрия северо-восточной части Балтийского щита. // Л.: Наука, 1978. 263 с.
3. Вагин С.А., Варданыц И.А., Ковтун А.А., Коквина Е.Л., Моисеев О.Н., Савельев А.А., Успенский Н.И. "Береговой эффект" и сопротивление коры на Кольском полуострове. // Геомагнетизм и аэронавигация. М. 1985. Т. XXV. № 3. С. 468-473.
4. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Жданов М.С. Эксперимент "Хибины". // Земля и Вселенная. 1984. № 5. С. 12-18.
5. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.
6. Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой. // Ред. акад. Е.П. Велихов, Ю.Л. Войтеховский, А.А. Жамалетдинов. Апатиты: Изд-во Геологического института КНЦ РАН, 2014. 205 с. ISBN 978-5-902643-23-4
7. Горяинов П.М., Давиденко И.В. Тектоно-кессонный эффект в массивах горных пород и рудных месторождений - важное явление гединамики. // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 5. С. 1212-1215.
8. Жамалетдинов А.А. Дилатантно-диффузионная модель электропроводности земной коры по результатам комплексного анализа данных СГ-3. // Российский геофизический журнал. СПб.: Изд. ФГУНПП «Геологоразведка», 2006. № 41-42. С. 22-28.
9. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л.: Наука, 1990. 159 с.
10. Жамалетдинов А.А. Нормальный электрический разрез кристаллического фундамента и его геотермическая интерпретация по данным МГД-зондирования на Кольском полуострове. // Глубинные электромагнитные зондирования с применением импульсных МГД-генераторов. Апатиты.: Изд-во Кольск. фил. АН СССР, 1982. С. 35-46.
11. Жамалетдинов А.А., Токарев А.Д., Васильев А.Н., Виноградов Ю.А., Колодин Г.Н., Казанцев Н.П. Частотное электромагнитное зондирование на Мурманском блоке. // В кн.: Проблемы комплексной интерпретации геолого-геофизических данных. АН СССР. 1991. Л. С. 94-97.
12. Жамалетдинов А.А., Семенов А.С. Электронно-проводящие породы северо-западной части Кольского п-ва. // Уч. зап. ЛГУ. 1978. № 392. Вопросы геофизики. № 27. С.99-107.
13. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Корья Т. Частотное электромагнитное зондирование земной коры на территории Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса. // Известия РАН. Физика Земли. 2002. № 11. С. 54-68.
14. Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданыц И.Л., Легенькова Н.П., Смирнов М.Ю., Успенский Н.И. Особенности строения Карельского региона по данным геоэлектрических исследований. // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления (ред. Н.В. Шаров). Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2004. С. 102-129
15. Ковтун А.А., Успенский Н.И. Модели электрического разреза коры и верхней мантии по данным МТЗ и АМТЗ // Строение литосферы Балтийского щита (ред. Н.В. Шаров). М.: Изд. нац. геофиз. комитета РАН, 1993. С. 81-83.
16. Митрофанов Ф.П. (Гл. ред.). Геологическая карта Кольского региона в м-бе 1:500000. Апатиты. 1996.
17. Родкин М.Ф. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. // М. 1993. 193 с.
18. Семенов А.С. Электрический разрез кристаллических пород древних щитов // Вопросы геофизики. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. Вып. 27. С. 108-113.
19. Bernstein, S.L., Burrows, M., Evans, J.E. et al. Long Range Communication at Extremely Low Frequencies. Proc. IEEE, 1974. V. 62. N. 3. P. 292-312.
20. Jones A. Imaging and observing the electrical Moho. // Tectonophysics. 609. (2013). P. 423-436.

Мониторинг влияния лунно-солнечных приливных напряжений на электропроводность земной коры на территории Фенноскандинавского щита в поле СНЧ-антенны «Зевс» и в естественных полях (обзор)

А.А. Жамалетдинов, Т.Г. Короткова

Геологический институт КНЦ РАН, abd.zham@mail.ru

Среди геофизических явлений, сопровождающих лунно-солнечные приливные деформации, особый интерес представляет их влияние на глубинную электропроводность, поскольку эта информация может быть непосредственно связана с флюидным режимом земной коры. Теоретические исследования приливных деформаций выполняются, главным образом, с применением численных методов расчета амплитуды и фазы приливных возмущений водной поверхности морей и океанов [9] или твердой оболочки Земли [41]. Экспериментальное изучение приливных деформаций твердой оболочки Земли проводится, главным образом, с помощью высокоточных наклономеров, устанавливаемых в штольнях, или путем проведения прецизионных гравиметрических наблюдений в обсерваториях. В любом случае, речь идет об измерении ничтожно малых величин. Например, в гравитационное поле Земли влияние лунно-солнечных приливов вносит аномальный эффект порядка 0.2 мГл [42], что составляет менее одной миллионной доли от ускорения силы тяжести на Земле. Влияние лунно-солнечных приливов на наклоны земной поверхности измеряется десятками долями секунд углового градуса, что находится на пределе измерительных возможностей даже при размещении наклономеров в шахтах на глубинах до 500 м и более [18].

Первый положительный опыт измерения влияния приливов на электропроводность земной коры был получен в Японии в начале 60-х годов в связи с задачей мониторинга электромагнитных предвестников землетрясений [26]. В последующие годы задача экспериментального изучения влияния лунно-солнечных приливов на электропроводность земной коры рассматривалась на Гармском геодинимическом полигоне [2] и на Ашхабадском полигоне [1]. Ниже приведен обзор работ по изучению влияния лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность земной коры, выполненных на территории Фенноскандинавского щита с применением СНЧ-антенны «Зевс» и естественных источников.

1. Мониторинг на полигоне «Вуокса», Карельский перешеек

В работе [30] описаны результаты электромагнитного мониторинга лунно-солнечных приливов на полигоне Вуокса, расположенном на Карельском перешейке. Полигон находится на расстоянии 950 км от СНЧ-радиоустановки «Зевс» (рис. 1) на южной окраине Балтийского щита, в пределах Вуоксинского массива гранодиоритов среднепротерозойского возраста. Сама СНЧ-радиоустановка располагается на Кольском полуострове и представляет собой две параллельные друг другу горизонтальные заземленные линии АВ длиной 55-60 км, ориентированные в широтном направлении [6]. Мониторинг проводился на частоте 82 Гц при силе тока до 300 А.

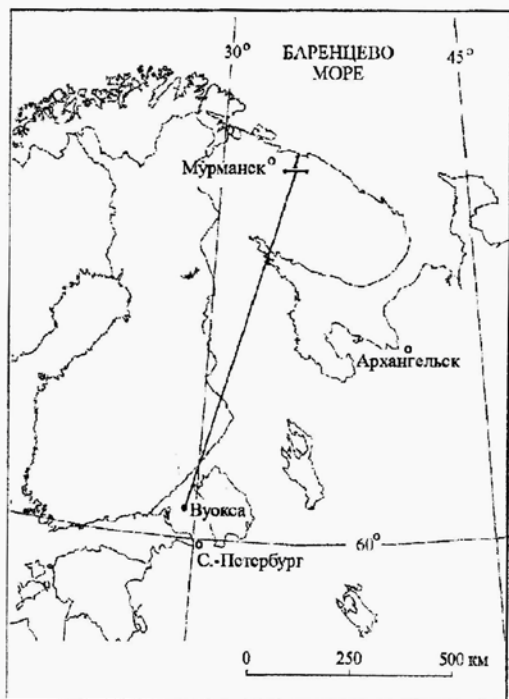


Рис. 1. Расположение полигона «Вуокса» относительно антенны «Зевс»

Для измерения сигналов СНЧ-радиоустановки авторами разработан прибор АКФ-2.2, в котором реализовано разрешение по частоте 0,007 Гц. Запись велась в режиме накопления корреляционных функций и в режиме прямой записи временных рядов с узкополосной фильтрацией. Узкополосный режим измерений позволил поднять соотношение «сигнал-шум» по параметру спектральной плотности мощности до двух порядков, несмотря на значительное удаление от источника поля. Результаты мониторинга, проводившегося в течение 24 часов в июне 1996 года, приведены на рис. 2. Как видно из рисунка 2, сглаженная кривая кажущегося сопротивления ρ_k почти совпадает с теоретически рассчитанной кривой изменения вертикальной компоненты приливных деформаций земной поверхности dH . Коэффициент корреляции между значениями ρ_k и dH оценивается авторами величиной 0.73. На основе полученных данных авторами построен график зависимости измеренных значений кажущегося сопротивления от амплитуды вертикального смещения земной поверхности (рис. 3). Уравнение линейной корреляционной связи кажущегося

сопротивления ρ_k и приращения вертикальной компоненты dH имеет вид $1.097 + 0.240 dH$. Приращение dH

выражено в метрах значение ρ_k в кОмметрах. Общая амплитуда изменения ρ_k в течение суток составила примерно 7%, что мало отличается от величин, полученных ранее на Гармском и Ашхабадском геофизических полигонах.

Сопоставление кривых ρ_k и dH (рис. 2 и 3) показывает, что повышение кажущегося удельного сопротивления соответствует поднятию земной поверхности, а понижение ρ_k - ее опусканию. Такой характер связи кажущегося удельного сопротивления ρ_k с вертикальными приливными движениями земной поверхности dH мы называем положительным.

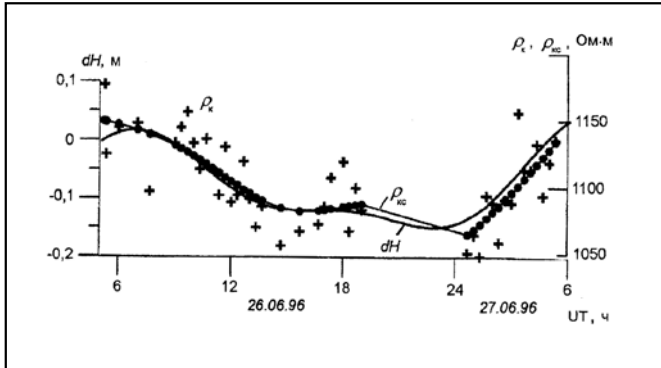


Рис. 2. Мониторинг приливных изменений кажущегося сопротивления ρ_k на полигоне «Вуокса».

ρ_k - измеренные значения, ρ_{kc} - сглаженная кривая, dH - вертикальные смещения земной поверхности.

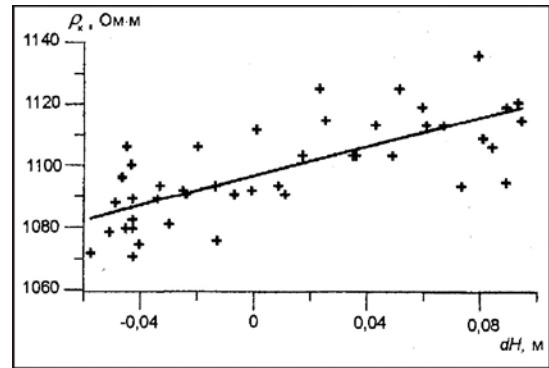


Рис. 3. Корреляционная зависимость кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k и амплитудных значений вертикальной компоненты приливных смещений земной поверхности dH .

Положительную связь изменений ρ_k с приливными деформациями авторы объясняют так называемым "эффектом губки" [21]. Считается, что при опускании земной поверхности (при отливах) земная кора сжимается и в результате сжатия вода в скважинах и колодцах поднимается (наблюдается своего рода инверсия). Во время подъема земной поверхности (при приливах) земная среда, наоборот, расширяется и происходит движение воды в обратном направлении - она опускается в скважинах и колодцах. По данным [21] описанные колебания уровня воды, связанные с лунно-солнечными суточными приливами, достигают 2-3 см.

Авторы работы [30] полагают, что движение поровых и капиллярных вод в горных породах имеет такой же механизм. При сжатии вода проникает в мелкие трещины, поры и капилляры породы, образуя сеть взаимосвязанных пленок и каналов. При ослаблении давления происходит отток воды из мелких трещин, пор, и капилляров, и форма нахождения флюида в горной породе приобретает островной, менее связанный между собою характер. Удельное сопротивление горной породы в случае изменения давления меняется, главным образом, за счет изменения характера распределения флюида в межпоровом пространстве. Оно понижается при большей степени связи воды в результате сжатия, и повышается при меньшей степени связи в результате растяжения среды. Отметим, что средние значения кажущегося удельного электрического сопротивления земной коры в районе исследований на частоте мониторинга 83 Гц составляют 1200 Ом·м. Отсюда максимальная глубина проникновения поля составляет 1-1.5 км.

2. Мониторинг на полигоне «Авва-губа» (Кольский п-ов)

Полигон Авва-губа расположен в юго-западной части Кольского полуострова на территории распространения архейских гранито-гнейсов Енского сегмента Беломорского комплекса [26]. Положение источника «Зевс» и пункта наблюдений Авва-губа представлено на рис. 4. СНЧ-антенна «Зевс», как уже упоминалось выше, представляет собой заземленную на концах линию АВ длиной порядка 60 км. Сила тока в источнике составляла 200 А [6]. Линия АВ ориентирована в широтном направлении. Расстояние между центром АВ и точкой наблюдений - 180 км. Азимут относительно линии АВ на точку приема составляет 55 градусов. Эксперимент проводился в течение двух дней непрерывно с 26 по 28 июня 1998 года. Частота тока в источнике 83.3 Гц. Ток подавался по 6 мин через каждые 30 минут в течение двух суток.

Сигналы измерялись с помощью пятиканальной цифровой измерительной станции СЧЗ-95 [35]. Работа станции СЧЗ-95 основана на принципе супергетеродина с промежуточной частотой 1 Гц, выделяемой методом узкополосной фильтрации. В процессе наблюдений регистрировались четыре компоненты поля - две электри-

ческие компоненты (E_x , E_y) и две магнитные (H_x , H_y). Датчики магнитного поля и приемные линии MN ориентировались по магнитным широте (ось X) и меридиану (ось Y). Приемниками электрического поля служили две взаимно ортогональные заземленные линии длиной по 500 м (Г-образная установка). Датчиками магнитного поля служили две индукционные катушки; каждая по 240 тысяч витков медного провода на пермалловых стержнях. Благодаря большой мощности передатчика соотношение “сигнал-шум” в пункте измерений Авва-Губа достигало 30 дБ по электрическим и магнитным компонентам. Передатчик и точка наблюдений расположены на однородных блоках земной коры высокого сопротивления, достаточно далеко от областей распространения электронно-проводящих пород, коровых проводников (рис. 4) [11].

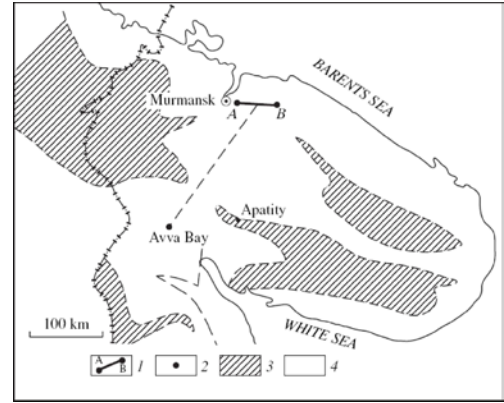


Рис. 4. Положение источника «Зевс» (1) и полигона Авва-губа (2). 3 – коровые проводники, 4 – плохо проводящие блоки

Результаты электромагнитного мониторинга показаны на рис. 5 в виде четырех графиков. В верхней части рисунка приведены результаты измерений кажущегося удельного электрического сопротивления, рассчитанного по входному импедансу для сопряженных компонент $E_x H_y$ и $E_y H_x$. В нижней части рисунка приведены графики изменений фазовых сдвигов между сопряженными электрическими и магнитными компонентами $E_x H_y$ и $E_y H_x$.

Для сравнения на всех графиках измеренных величин приведена кривая изменения вертикальной составляющей dH лунно-солнечных деформаций земной коры. Величина dH рассчитана теоретически для пункта наблюдений с помощью алгоритма [41], принятого в качестве международного стандарта. Мониторинг проводился в период, когда Луна находилась в районе квадратуры и поэтому амплитуда колебаний поверхности Земли не превышала 8 см, тогда как максимальные приливно-отливные колебания уровня земной поверхности в периоды противостояния (сизигии) на широте Кольского полуострова могут достигать 15-20 см.

Кажущееся удельное сопротивление рассчитано по входному импедансу применительно к условиям дальней, волновой зоны квазистационарного приближения. Визуальное сравнение теоретических кривых dH и экспериментально зарегистрированных изменений кажущегося удельного сопротивления ρ_T^{xy} и ρ_T^{yx} по входному импедансу показывает их высокую степень корреляции (рис. 5). Видно, что значения кажущегося

удельного сопротивления изменяются в противофазе с колебаниями земной поверхности. Такую корреляцию мы называем отрицательной. Подъем земной поверхности (прилив) соответствует уменьшению кажущегося удельного сопротивления и, напротив, опускание поверхности Земли (отлив) отвечает увеличению удельного сопротивления. Если убрать из внимания явно искаженные помехой результаты наблюдений в районе 12 часов мирового времени, то средняя амплитуда изменений кажущегося сопротивления по широтной компоненте ρ_T^{xy} составляет 15% и по меридиональной компоненте 11%. Погрешность измерений составляет 2 %.

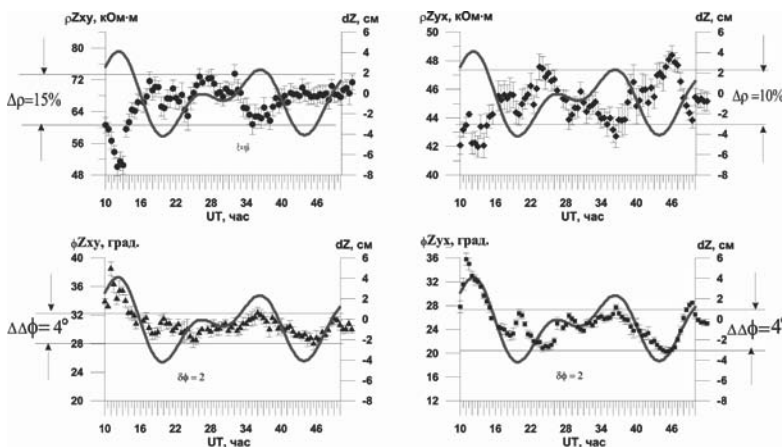


Рис. 5. Результаты мониторинга на полигоне Авва-губа

Корреляция фазовых кривых с приливно-отливными деформациями имеет положительный знак (рис. 5). Она выражена даже более четко по сравнению с кривыми кажущегося удельного сопротивления. Увеличение разности фаз совпадает с приливом (с поднятием земной поверхности), и наоборот уменьшение разности фаз совпадает с отливом. Средние фазовые изменения $\Delta \Delta \varphi_{E_x H_y}$ составляют примерно 6-8 градусов при абсолютной погрешности наблюдений в 1-2 градуса.

На рис. 6 представлены результаты обработки данных с использованием метода наименьших квадратов. Следующие уравнения линейной регрессии соответствуют зависимости между вертикальной составляющей приливо-отливных деформаций dH (в метрах) и кажущегося удельного сопротивления (килоОмметры) и разности фазы импеданса (градусы).

$$\rho_T^{xy} = 66 - 120 \cdot dH, \text{кОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho_T^{yx} = 45 - 42 \cdot dH, \text{кОм} \cdot \text{м}$$

$$\Delta\varphi_{xy} = 31 + 53 \cdot dH, \text{градусы}$$

$$\Delta\varphi_{yx} = 26 + 105 \cdot dH, \text{градусы}$$

$$c_{corr} = -0.61$$

$$c_{corr} = -0.69$$

$$c_{corr} = +0.7$$

$$c_{corr} = +0.77$$

(1)

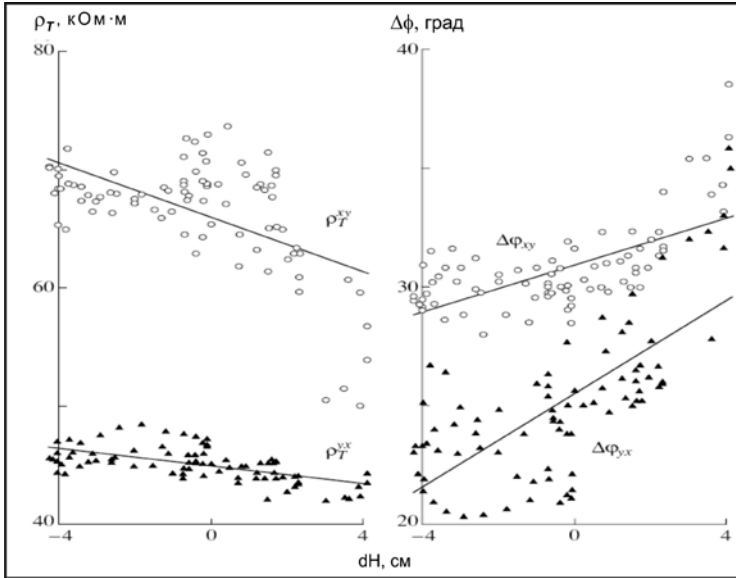


Рис. 6. Пример обработки результатов мониторинга методом линейной регрессии.

Из результатов, показанных на рисунках 5 и 6, видно, что изменения кажущегося удельного сопротивления ρ_T и фазовых сдвигов между компонентами электрического и магнитного поля имеют разный знак относительно приливных возмущений земной поверхности. Подъемы земной поверхности (приливы) сопровождаются уменьшением кажущегося удельного сопротивления и возрастанием сдвига фаз. Напротив, опускания земной поверхности (отливы) сопровождаются увеличением ρ_T уменьшением фазового сдвига.

Зависимость между значениями удельного сопротивления ρ_T и фазы может быть выражена приближительным дисперсионным уравнением Вайдельта [45],

$$\Delta\varphi_k(T) = \frac{\pi}{2} + 2 \arg Z,$$

где

$$\arg Z(T) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\partial \lg |Z(\sqrt{T})|}{\partial \lg \sqrt{T}} \quad (2)$$

Эта зависимость отражает общий физический принцип причинной связи [29]. Кроме того, из этого уравнения следует, что увеличение фазового сдвига соответствует уменьшению кажущегося удельного сопротивления. Корреляция противоположных знаков между амплитудой и фазой импеданса указывает на индукционный характер изменений кажущегося удельного сопротивления. Это позволяет заключить, что отмеченные суточные изменения кажущегося удельного сопротивления связаны с изменениями удельного сопротивления в верхнем слое земной коры, сопоставимом по мощности с толщиной скин-слоя $H_{\text{скин}}$ и длиной электромагнитной волны в земле λ .

$$H_{\text{скин}} \approx \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{10^7 \cdot \rho T}}{2\pi\sqrt{2}}, \text{ м}. \quad (3)$$

Принимая среднее значение кажущегося удельного сопротивления $\rho = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, легко найти, что глубина $H_{\text{скин}}$ на частоте 83.3 Герц будет 8.7 км.

Дополнительно на рисунке 7 приведены результаты теоретического расчета проявления на кривых кажущегося сопротивления и фазы возможных изменений удельного сопротивления вещества в промежуточном проводящем слое в диапазоне глубин от 3 до 8 км. Из приведенного рисунка можно видеть, что изменение удельного сопротивления слоя в два раза приводит к изменению кажущегося сопротивления примерно на 10% и фазы - на 5 градусов, что сопоставимо с приведенными выше оценками, полученными по экспериментальным данным в точке Авва-губа.

Таким образом, результаты электромагнитного мониторинга на полигоне Авва-губа, в отличие от результатов мониторинга на полигоне Вуокса [30], указывают на отрицательную корреляцию кажущегося сопротивления с приливными деформациями земной поверхности. В этом случае в работе [13] предлагается следующая интерпретация. При подъеме поверхности земной коры под действием лунно-солнечных приливообразующих сил происходит разуплотнение вещества и, следовательно, увеличение пористости и влагонасыщенности горных пород, что ведет к уменьшению их удельного электрического сопротивления. При отливке же, за счет сжатия пород, происходит уменьшение объема порового пространства и наблюдается увеличение удельного сопротивления. Аналогичная зависимость удельного сопротивления кристаллических горных пород от давления наблюдается в лабораторных условиях [25]. При интерпретации результатов мониторинга в точке Авва-губа предполагается, что максимальный эффект в суточные изменения кажущегося удельного сопротивления вносит промежуточный проводящий слой в интервале глубин от 3 до 7-10 км. Природа промежуточного проводящего слоя связана с наличием пленочных диффузионных вод метеорного происхождения, приуроченных к области проявления в земной коре дилатансионной трещиноватости. Условия дилатансии на глубине возникают вследствие одновременного воздействия на горные породы литостатического (нормального) и касательного (тангенциального) напряжений. Дилатантно-диффузионная теория флюидного режима земной коры впервые была предложена в работе [43] по результатам сейсмологических исследований на Гармском геодинамическом полигоне. Позднее эта теория получила развитие в работах В.Н. Николаевского (1986). Согласно этой теории механизм дилатансии определяется как необратимое увеличение объема поликристаллических агрегатов при сдвиге в условиях хрупкого разрушения. Сам факт существования промежуточной проводящей области дилатантно-диффузионной природы в земной коре (ДД-слоя) на глубинах от 3 до 7-10 км впервые был установлен нами по результатам частотных зондирований в пределах Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса. [46, 15] и в Ковдорском районе Кольского полуострова [37].

3. Электромагнитный мониторинг по МТ-данным эксперимента «BEAR»

Чтобы изучить возможное проявление приливо-отливных эффектов на больших глубинах, нами были проанализированы результаты синхронных измерений вариаций магнитотеллурического поля на сети станций эксперимента BEAR, осуществленного летом 1998 года [39]. Измерения выполнены на 49 станциях, размещенных на территории Фенноскандинавского щита по сети 150x150 км. Синхронные измерения проводились в течение 1.5 месяцев в июне-июле 1998 года. Шаг дискретизации составлял 2 с.

Обработка результатов МТЗ для задачи мониторинга выполнена Т.Г. Коротковой с использованием программы В.Ю. Семенова [30], модифицированной В.Э. Асмингом и А.Н. Шевцовым для обработки больших массивов МТ-данных в интерактивном режиме [19]. Режим полуавтоматической обработки позволил последовательно контролировать все этапы обработки МТЗ от подготовки данных для программы В.Ю. Семенова до построения фазовых и амплитудных кривых кажущегося сопротивления и полярных диаграмм.

На вход программы подается файл, содержащий значения четырех горизонтальных компонент магнитотеллурического поля (H_x , H_y и E_x , E_y) и метки времени в секундах, привязанные к мировому стандарту с помощью спутниковой связи GPS. Каждая реализация автоматически делится на отрезки по 1024 дискрета. В зависимости от шага осреднения это может соответствовать длительности выборок - 2048 с, 4096 с и т.д. Нас интересует изменение сопротивления на коротких периодах. Так как шаг дискретизации данных "BEAR" по времени равен 2 с, то самый короткий период, который можно обнаружить в спектре записи составляет 5-10 с.

Алгоритм программы Семенова основан на теории случайных процессов, поэтому на начальной стадии программы исходная запись результатов МТЗ приводится к виду, пригодному для обработки - запись фильтруется с целью исключения из анализируемого процесса явных периодичностей и удаления среднего уровня записи с самым низким периодом ("тренда"). При обработке на основе случайных процессов особое внимание уделяется достоверности определения передаточных функций между компонентами

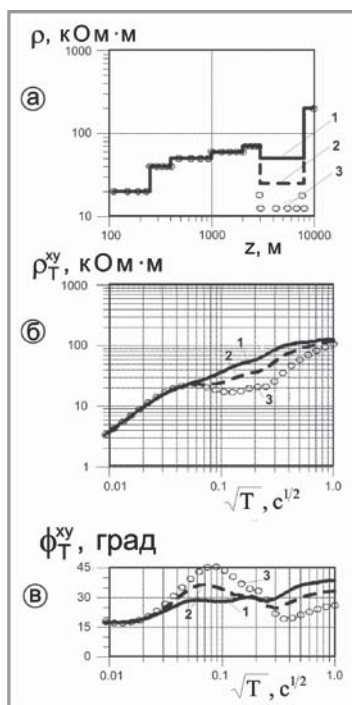


Рис. 7. Пример расчета влияния на фазу и амплитуду кажущегося сопротивления изменений параметров промежуточного слоя.
 а) – модели с промежуточным слоем: 1- 0.1 $\text{k}\Omega \cdot \text{m}$, 2- 0.2 $\text{k}\Omega \cdot \text{m}$, 3- 0.4 $\text{k}\Omega \cdot \text{m}$,
 б) - графики кажущегося сопротивления для моделей 1-3.
 в) – графики фазы кажущегося сопротивления для моделей 1-3.

электромагнитного поля. Поэтому, чтобы определить интервал, в котором с заданной вероятностью лежит истинное значение оцениваемой передаточной функции, в программе вычисляются коэффициенты множественной когерентности, а также частные и входные когерентности. Важнейшим свойством когерентности является ее инвариантность относительно вращения системы координат непосредственно по данным наблюдений. Величины коэффициентов когерентностей представляют, в некотором смысле, даже более надежные оценки достоверности результатов обработки, чем доверительные интервалы [31].

Наиболее полный анализ приливных явлений BEAR выполнен в точке В-47, расположенной на геофизической станции Лехта (Центральная Карелия). Близкая амплитуда минимальных и максимальных кривых кажущегося сопротивления и их конформный характер в точке В-47 указывают на то, что результаты наблюдений почти не искажены влиянием горизонтальной неоднородности среды и, следовательно, подстилающий разрез имеет структуру, близкую к одномерной.

Результаты обработки данных в точке В-47 (Лехта) представлены на рис. 8. Можно видеть, что приливно-отливные эффекты явно обнаруживаются на короткопериодных ветвях кривых кажущегося сопротивления. В самые короткие периоды 10 - 20 с (что соответствует глубине проникновения поля 70-100 км) различие между кривыми достигает 60 %. Оценка интервалов достоверности проводилась с использованием метода наименьших квадратичных отклонений и метода регрессионного анализа.

Корреляционная связь изменений кажущегося сопротивления с приливами в точке Лехта имеет отрицательный знак. В фазе подъема земной поверхности (прилива) происходит уменьшение кажущегося сопротивления; в фазе опускания земной поверхности (отлива) происходит увеличение кажущегося сопротивления. С увеличением периода вариаций происходит постепенное уменьшение влияния приливов на кажущееся сопротивление и на периодах свыше 30–40 с влияние приливов полностью теряется за помехами.

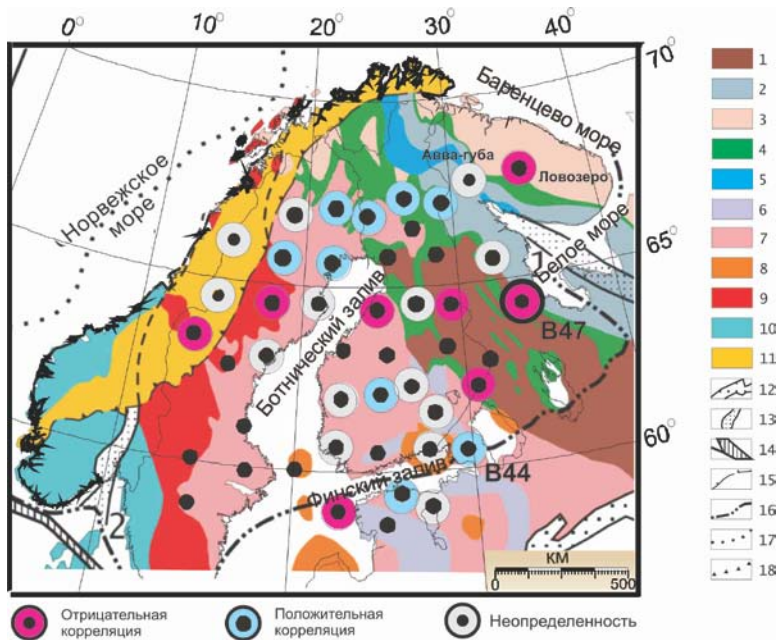


Рис. 9. Результаты анализа влияния приливов на результаты МТЗ по данным эксперимента «BEAR» на геологической основе [8]. Легенда: (1-3) - верхний архей, (4-7) - нижний протерозой, 8-10 – верхний протерозой, 11 - каледониды, (12-18) – геологические границы и разломы.

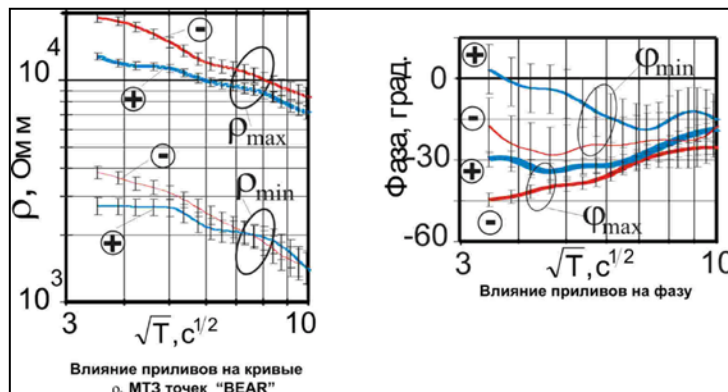


Рис. 8. Результаты изучения влияния приливов на данные МТЗ в точке Лехта (пункт В-47, BEAR).

Знак «-» в кружке означает, что обработка выполнена в интервалы опускания земной поверхности, знак «+» - в интервалы подъема.

Это может означать, что на больших глубинах (более 70-100 км) тензочувствительность электрического сопротивления вещества верхней мантии становится меньше в связи с увеличивающейся пластичностью пород под действием возрастающей с глубиной температуры и давления.

Обработка всего массива данных эксперимента BEAR показывает, что знак и амплитуда изменений электропроводности литосферы в магнитотеллурическом поле под действием лунно-солнечных приливообразующих напряжений непостоянны и изменяются в пространстве. На рис. 9 представлена схема распределения знаков приливных изменений в сопоставлении с геологической картой Балтийского щита [8].

На карте красными точками показаны пункты МТЗ с отрицательным знаком влияния приливных возмущений (как, например, в точке Лехта, В-47), голубыми точками показаны пункты МТЗ с положительным знаком, точки с

нулевым и неопределенным эффектом отмечены белым цветом. Можно видеть, что изменения знака приливных вариаций электропроводности в большей мере согласуются с региональными особенностями геологии Балтийского щита, нежели с особенностями изменения сопротивления горных пород. Отрицательная корреляция большей частью наблюдается над архейскими блоками гранито-гнейсовых пород (1-3 на рис. 9), тогда как положительная корреляция чаще наблюдается над более молодыми протерозойскими комплексами. Можно отметить также, что знаки корреляции по результатам мониторинга в естественных и контролируемых полях совпадают. В частности, на Карельском перешейке, в районе полигона Вуокса отмечена положительная корреляция в пункте В-44 «BEAR» (рис. 10), согласующаяся с результатами описанного выше мониторинга в работе [30].

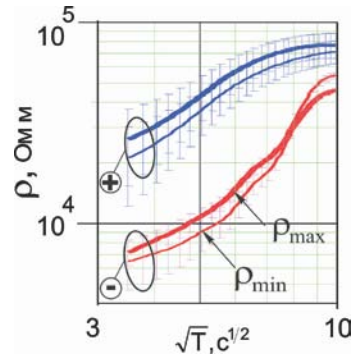


Рис. 10. Результаты исследования данных МТЗ в пункте В-44 «BEAR» (на полигоне Вуокса). Знак «-» в кружке - обработка в интервалах опускания земной поверхности, знак «+» - в интервалах подъема.

В ходе проведенных работ рассматривались различные варианты выбора временных интервалов. Наряду с вышеизложенным исследованием были обработаны выборки вариаций МТ-поля по временным интервалам, соответствующим дню и ночи, а также по временным интервалам, смещенным на 6 и 12 часов относительно истинного положения максимума прилива. На рис. 11 проиллюстрировано поведение кривых МТЗ при разных смещениях точки отсчета. Как видно, смещение выборок на 6 часов относительно максимума прилива приводит к исчезновению эффекта, а смещение на 12 часов приводит к инверсии знака приливных изменений сопротивления МТЗ (с отрицательного знака на положительный). Это указывает на устойчивость наблюдаемых суточных изменений кажущегося сопротивления с приливными явлениями.

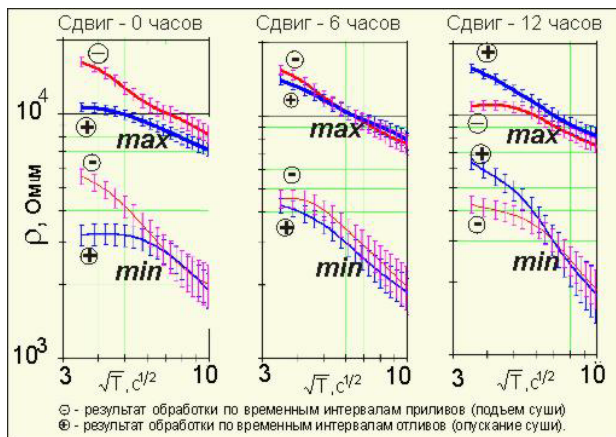


Рис. 11. Расчет приливных изменений кажущегося сопротивления в точке Лехта (В-47) со сдвигом по времени на 6 и 12 часов.

В целом результаты выполненного исследования показывают отчетливое влияние лунно-солнечных приливов на короткопериодные ветви отдельных кривых МТЗ, однако знак приливных эффектов меняется от точки к точке, а во многих точках не проявляется вообще. Все это указывает то, что физическая и геологическая трактовка результатов еще требует проведения дополнительных исследований.

4. Электромагнитный мониторинг на геофизической станции Ловозеро

В работе [33] описаны результаты электромагнитного мониторинга лунно-солнечных приливных вариаций в поле СНЧ-антенны «Зевс». Мониторинг проводился на геофизической станции Ловозеро в июле 2009 года. Положение станции Ловозеро относительно источника «Зевс» показано на рис. 12 на геологической схеме [22]. На этой же схеме показаны пункты мониторинга в точке Авва-губа [13] (описание приведено двумя разделами выше) и на полигоне ИВП (Имандра-Варзугский полигон). Результаты мониторинга на полигоне ИВП даны в следующем, 5-м разделе настоящего обзора. Расстояние между центром СНЧ-антенны Зевс и точкой Ловозеро составляет 90 км. Азимут между линией Зевс и направлением на точку приема составляет 65 градусов.

Важным достоинством работы на геофизической станции Ловозеро явилось то, что мониторинг проводился при практически непрерывной генерации тока в СНЧ-антенне «Зевс» в течение 30 суток на частоте 82 Гц при стабильном значении силы тока в районе 200 А. Параметры тока фиксировались с помощью цифровой системы сбора данных, имеющей привязку к мировому времени с помощью навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

Обработка результатов мониторинга выполнена по четырем компонентам электромагнитного поля (E_x , E_y , H_x , H_y), ориентированным по магнитной широте и магнитному меридиану. Датчиками электрического поля служили две взаимно-ортогональные линии MN по 200 м длиной. Датчиками магнитного поля служили индукционные катушки.

Результаты обработки данных мониторинга представлены в виде относительных вариаций импеданса и отдельных компонент поля, приведенных к средним значениям по отдельным выборкам. Такой подход, наряду с определенными удобствами, имеет тот недостаток, что не позволяет получить количественных представлений об электрических свойствах исследуемой среды. При анализе результатов мониторинга авторы уделили основное внимание 14-суточной вариации приливного смещения земной поверхности, связанной со сменами фазы Луны от противостояния (сизигии) к квадратуре. По результатам замеров установлено, что изменения относительного импеданса происходили в противофазе с медленной приливной волной вертикального смещения земной поверхности. То есть наблюдалась отрицательная корреляция изменений удельного электрического сопротивления среды с приливами и отливами. Слабые подъемы земной поверхности с амплитудой порядка 10 см сопровождалось уменьшением относительного импеданса на 0.3 – 0.5 % и наоборот. Если перевести импеданс в значения кажущегося сопротивления, то вариации составят интервал от 0.5 до 1%.

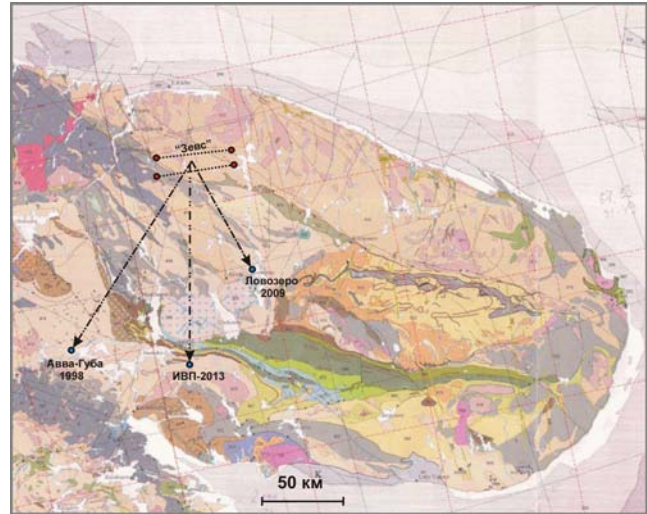


Рис. 12. Расположение пунктов мониторинга «Ловозеро», «Авва-губа» и «ИВП» (Имандра-Варзугский полигон). Геологическая основа по [22].

Суточные вариации компонент электромагнитного поля, по мнению авторов, вызваны колебаниями ионосферных параметров, связанных с изменениями освещенности ионосферы Солнцем. Авторами установлено почти десятикратное превышение относительной амплитуды вариаций отдельных компонент поля над амплитудой относительных изменений импеданса. На этом основании делается вывод, что значимых суточных изменений поверхностного импеданса, указывающих на изменение удельного сопротивления подстилающей среды под действием приливных возмущений не наблюдается. Тем не менее в работе [33] приведен график относительных изменений импеданса Z за весь период мониторинга (рис. 13). На графике Z явно видна суточная периодичность изменений импеданса, ослабевающая в периоды квадратур, когда амплитуда приливных деформаций земной поверхности минимальна.

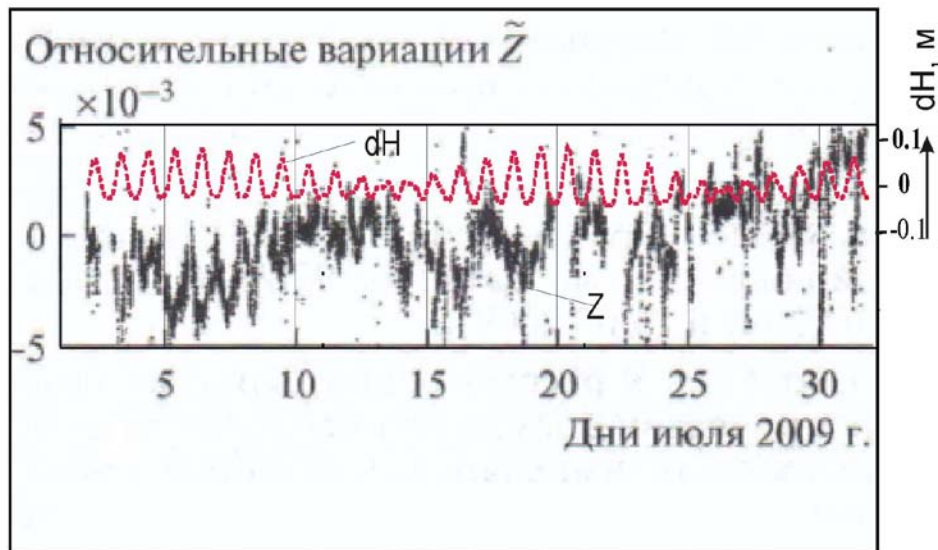


Рис. 13. График изменений относительного импеданса $\tilde{Z}$ по результатам мониторинга на геофизической станции Ловозеро [32] и график изменений вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных вариаций рассчитанных по программе [41].

На рисунок 13 мы нанесли график изменения вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных вариаций рассчитанный по программе [41]. Визуальный просмотр позволяет заметить отрицательную корреляцию приливов с изменениями импеданса. Наиболее отчетливо отрицательная корреляция наблюдается в интервал времени с 5 по 10 июля. Средняя амплитуда суточных изменений импеданса Z составляет 0.5%. Такая же амплитуда изменений отмечена авторами для 14-суточных вариаций. При пересчете входного

импеданса Z в значения кажущегося сопротивления средний размах относительных суточных вариаций составляет 1%. Формула пересчета имеет вид

$$\rho_T = Z^2 / \omega \cdot \mu_0, \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad (4)$$

На левой панели рис. 14 приведен график относительного импеданса Z , рассчитанный путем сплайн-интерполяции на основе первичных данных, приведенных на рис. 13. На тот же рисунок нанесен синхронизированный график изменения вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных вариаций dH , рассчитанный по программе [41]. Можно видеть, что поведение Z от dH аналогично рассмотренному на рис. 13. В правой части рис. 14 приведены результаты расчета линейной регрессии Z от dH . Несмотря на большой разброс значений, уравнение регрессии указывает на отрицательную корреляцию значений относительного импеданса и относительной амплитуды вертикальных приливных возмущений земной поверхности.

Таким образом, результаты мониторинга на геофизической станции Ловозеро [33] подтверждают данные, полученные ранее на полигоне Авва-губа [13]. В обоих пунктах мониторинга наблюдаются суточные изменения относительного импеданса (кажущегося сопротивления), находящиеся в отрицательной корреляционной связи с лунно-солнечными приливами. Наряду с этим, необходимо отметить существенное различие результатов. Средняя амплитуда вариаций кажущегося сопротивления на полигоне Авва-губа составляет 10-15%, тогда как на геофизической станции Ловозеро эта величина не превышает 1 %.

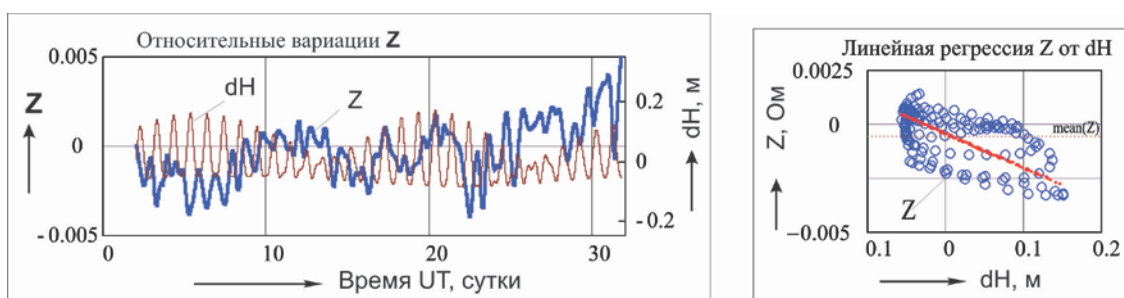


Рис. 14. Графики относительного импеданса Z и вертикальных приливных деформаций dH (левая панель) и график линейной регрессии Z от dH (правая панель) по результатам мониторинга на геофизической станции Ловозеро по данным [33].

Одним из объяснений наблюдаемого различия результатов может быть то, что геофизическая станция Ловозеро находится в зоне пониженного сопротивления земной коры. По данным работы [14] кажущееся сопротивление на частоте 80-100 Гц на территории геофизической станции Ловозеро составляет 1.5 тыс. Ом, тогда как на полигоне Авва-губа эта же величина достигает 50-70 тыс. Ом (рис. 5). Возможно, этим фактом, то есть в 30-40 раз более высоким сопротивлением вещества земной коры и отсюда более высокой тензочувствительностью сопротивления объясняется более высокая относительная амплитуда суточных приливных изменений сопротивления на полигоне Авва-губа по сравнению с Ловозеро.

Другое истолкование результатов может быть связано с тем, что глубина проникновения электромагнитного поля в пункте Ловозеро на частоте 82 Гц не превышает 1.5 км из-за низкого сопротивления горных пород (1500 Ом·м). Это означает, что в поле электромагнитного зондирования от источника Зевс в Ловозеро не попадает промежуточный проводящий слой дилатантно-диффузионной природы (ДД-слой), располагающийся в диапазоне глубин от 3 до 7-10 км и рассматриваемый в качестве основного объекта, наиболее чувствительного к влиянию лунно-солнечных приливных деформаций. В пункте Авва-губа, где кажущееся сопротивление составляет 50-70 тыс. Ом·м, глубина зондирования на частоте 82 Гц достигает 8-9 км и, следовательно, в объем зондируемого пространства попадает вся тензочувствительная область земной коры, связываемая с ДД-слоем.

PS. В качестве замечания необходимо отметить, что в статье [33] на стр. 118 имеется, по-видимому, опечатка. Упомянуется, что средняя величина импеданса в Ловозеро на частоте 82 Гц составляет 5.8 Ом. При пересчете в значение кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_k на частоте 82 Гц по формуле (4)

мы получим величину 52 тысячи Ом·м, что в 35 раз превышает величину ρ_k , полученную в Ловозеро на той же частоте в работе [14]. Величина эта (52 кОм·м на частоте 82 Гц) не согласуется и с результатами МТЗ, полученными в Ловозеро предыдущими исследователями [27, 9, 6]. Эти материалы приведены в работе [14] совместно с результатами АМТЗ.

5. Электромагнитный мониторинг на Имандра-Варзугском полигоне

В период с 20 октября по 2 ноября 2013 года электромагнитный мониторинг влияния лунно-солнечных приливов на электропроводность земной коры был выполнен в поле СНЧ-антенны «Зевс» на Имандра-Варзугском полигоне (ИВП). Положение полигона ИВП относительно СНЧ-антенны «Зевс» показано выше на рис.12. Расстояние от ИВП до центра антенны Зевс составляет 160 км. Азимут относительно оси антенны на точку приема - 83 градуса. Измерения выполнялись с применением 7-канальной цифровой станции КВВН-7 [17] с частотой дискретизации 1 кГц. Электрическое поле измерялось с применением четырех линий MN длиной по 100 м, ориентированных по четырем странам света. Мониторинг проводился практически в экваториальной зоне источника. По этой причине надежно измерялись только меридиональная магнитная компонента Hx и две широтные линии Ex , ориентированные на восток и на запад относительно центра установки. Для подавления некогерентных шумов сигналы двух широтных электрических линий складывались. Дальнейшая обработка выполнена с применением процедуры накопления по программе В.Э. Асминга. Необходимость обработки накоплением определилась сложными условиями проведения мониторинга. Главная сложность заключалась в том, что источник «Зевс» включался по независимой программе, иногда со значительными перерывами. Изменялась также сила тока и порой частота. Кроме того, дополнительную сложность создавала близость аэропорта к точке наблюдения и связанные с этим импульсные помехи. Режим накопления позволял отслеживать создаваемые помехи и оперативно вводить необходимые корректировки.

Результаты электромагнитного мониторинга на полигоне ИВП приведены на рис. 15. На нем представлены два временных интервала обработки – с 20 по 24 октября и с 28 октября по 2 ноября. На левой

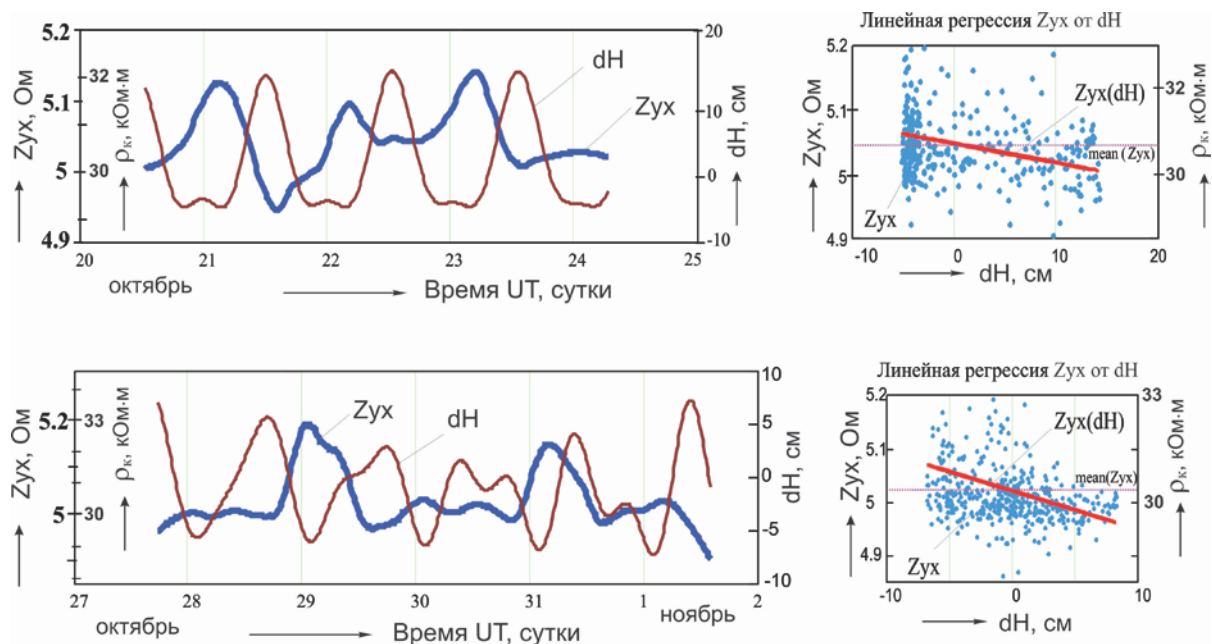


Рис. 15. Результаты электромагнитного мониторинга лунно-солнечных приливов в поле СНЧ-антенны «Зевс» на Имандра-Варзугском полигоне (ИВП). Положение источника «Зевс» и полигона ИВП показано на рис. 12.

панели рисунка 15 приведены непосредственно результаты накопления, представленные в виде графиков импеданса $Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x}$, (Ом), продублированные шкалой кажущегося сопротивления в килоОм·метрах. На рис.

15 приведены также кривые dH изменения вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных деформаций земной поверхности, рассчитанные по программе [41]. В правой части рисунка 15 приведены графики линейной регрессии Z_{yx} и dH , полученные путем обработки данных, показанных на левой панели, методом наименьших квадратов.

Из рассмотрения графиков накопления Z_{yx} в сопоставлении с графиками приливных движений dH можно отчетливо увидеть их отрицательную корреляцию – понижения земной поверхности сопровождаются увеличениями входного импеданса и наоборот. Средняя амплитуда относительных вариаций импеданса составляет 5% (полный размах) относительно среднего значения импеданса 5 Ом.

Амплитуда относительных вариаций кажущегося сопротивления (если пользоваться шкалой ρ_k) составляет 10% (полный размах) относительно среднего значения кажущегося сопротивления, которое составляет 38.6 тыс. Ом·м. На графиках линейной регрессии на рис. 15 отчетливо виден отрицательный знак корреляции, согласующийся по характеру и амплитуде с данными, полученными в пункте Авва-губа. На рисунке 16 приведен график зависимости амплитуды приливных вариаций кажущегося сопротивления (в процентах) от значения кажущегося сопротивления нижнего полупространства. Можно видеть, что зависимость этих параметров имеет линейный характер (см. табл.).

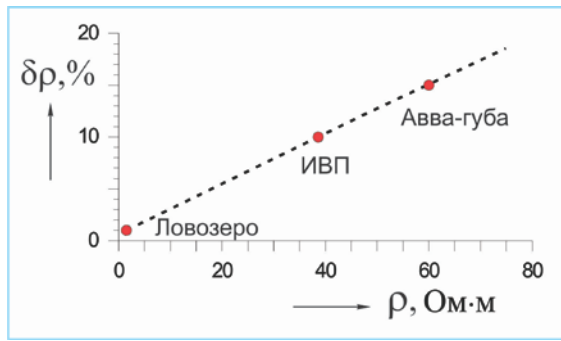


Рис. 16. Зависимость амплитуды приливных изменений кажущегося сопротивления (в процентах) от величины сопротивления нижнего полупространства

№ п/п	Пункты измерений	ρ , кОм·м	$\delta\rho$, %
1	Полигон Ловозеро	1.5	1%
2	Полигон ИВП	38.6	10%
3	Полигон Авва-губа	60	15%

Полученная зависимость указывает на то, что коэффициент тензочувствительности электрического сопротивления (КТЭ) и связанная с ним амплитуда приливных изменений удельного электрического сопротивления тем выше, чем выше сопротивление подстилающего полупространства.

Дискуссия.

Общий анализ полученных результатов указывает на высокую достоверность факта существования суточных изменений кажущегося удельного электрического сопротивления земной коры, коррелируемых с вертикальной компонентой лунно-солнечных приливных деформаций земной поверхности. Корреляция их между собой имеет отрицательный знак на территории Кольского полуострова. Отрицательный знак корреляции означает, что во времена приливов, то есть при подъеме земной поверхности, сопровождающемся ее растяжением, кажущееся удельное электрическое сопротивление земной коры понижается. Понижение сопротивления можно объяснить тем, что при снижении давления (при растяжении земной коры) увеличивается объем порового пространства в горных породах и увеличивается количество связанных токопроводящих каналов диффузионной, флюидной природы за счет их освобождения из замкнутых пространств. Во времена отливов (при опускании дневной поверхности и сжатии земной коры) наблюдается обратная картина - кажущееся удельное электрическое сопротивление возрастает вследствие увеличения давления и уменьшения количества свободных поровых пространств. Такой характер зависимости удельного сопротивления от давления хорошо согласуется с лабораторными данными, указывающими на увеличение сопротивления высокометаморфизованных горных пород в среднем на один порядок при росте давления на 1 ГПа, что соответствует глубине 30 км [40, 36].

Отмеченный знак корреляции наблюдается не повсеместно. В частности, по данным электромагнитного мониторинга на полигоне Вуокса [30] корреляция с приливами имеет положительный знак. Это означает, что во времена приливов (при подъеме земной поверхности) кажущееся удельное электрическое сопротивление земной коры увеличивается. Авторы объясняют это тем, что при подъеме земной поверхности, в результате снижения давления происходит ухудшение электрической связи между капиллярами и сопротивление возрастает. Во времена отливов (при опускании земной поверхности и сжатии земной коры) наблюдается обратная картина. Положительный знак корреляции в районе полигона Вуокса (на Карельском перешейке) наблюдается также и по данным низкочастотных магнитотеллурических зондирований в эксперименте BEAR (рис. 10).

Несмотря на описанные выше положительные результаты нескольких опытов мониторинга приливных явлений, приходится заметить, что связь ничтожных изменений гравитационного потенциала Земли под действием лунных приливов с реальным изменением электропроводности земной коры вызывает законные сомнения. Большая часть данных мониторинга находится на грани погрешности. В этой связи авторы работы [32] вообще отрицают корреляцию суточных вариаций входного импеданса с изменениями сопротивления нижнего полупространства, ссылаясь на их предполагаемую связь с колебаниями ионосферных параметров под действием изменяющейся освещенности ионосферы Солнцем. Наряду с этим, авторы работы [32], благодаря непрерывному мониторингу в течение месяца, получили принципиально новый результат в этой области – они установили корреляцию медленных изменений относительного импеданса с 14-суточными лунно-солнечными вариациями. Эта корреляция отчетливо обнаруживается на рисунке 13 при визуальном просмотре. Она имеет отрицательный знак, такой же, как и в суточных вариациях, и близка к ним по амплитуде. Поскольку на 14-суточные вариации импеданса никак не могли повлиять суточные изменения освещенности ионосферы, то полученный результат существенно повышает достоверность вывода о том, что лунно-солнечные суточные приливные деформации земной поверхности оказывают влияние на электропроводность Земли. К этому можно добавить, что главным

преимуществом входного импеданса на поверхности одномерного проводящего полупространства является то, что он, согласно граничным условиям Леонтовича-Рытова [20], не зависит от влияния ионосферы и токов смещения и несет на себе информацию только об электропроводности подстилающей среды [5, 37]. На этом основана вся теория магнитотеллурических зондирований, опирающаяся на модель Тихонова-Каньяра [34,38].

Завершая дискуссию, отметим, что накоплен довольно обширный экспериментальный материал по электромагнитному мониторингу лунно-солнечных приливов, материал разноплановый и во многом противоречивый. В этом отношении он напоминает результаты мониторинга предвестников землетрясений с применением электромагнитных методов [23, 32]. Эти две мониторинговые проблемы, не решенные до настоящего времени, во многом схожи между собой. Можно полагать, что решение задачи влияния лунно-солнечных приливов на электропроводность земной коры на территории Фенноскандинавского щита откроет новые подходы к решению проблемы поиска электромагнитных предвестников землетрясений в сейсмоактивных регионах мира.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-05-12044 офи-м. Авторы выражают благодарность коллегам А.Н. Шевцову и В.Э. Асмингу за помощь в программном обеспечении работы.

Список литературы

1. Авагимов А.А., Атаев А.И. и др. Связь аномальных изменений электросопротивления горных пород в разломной зоне с приливными деформациями земной коры. // Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн., хим. и геол. наук. 1988. № 5. С. 50-52.
2. Альтгаузен Н.М., Барсуков О.М. О временных вариациях электропроводности. // Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука, 1970. С. 101-110.
3. Барсуков О.М., Сорокин О.Н. Изменения кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1973. № 10. С. 100-102.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурические зондирования горизонтально-однородных сред. // М.: Недра, 1992. 250 с.
5. Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. // М. Недра, 1965. 108 с.
6. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Кононов Ю.М., Песин Л.Б., Кадышевич Г.М., Пертель М.И., Вешев А.В. Глубинные электромагнитные исследования с применением мощных сверхнизкочастотных радиоустановок. // Изв. Академии Наук. Физика Земли. 1998. № 8. С. 3-22.
7. Владимиров Н.П. Некоторые результаты глубинных магнитотеллурических зондирований в западной части СССР. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 11. С. 116-119.
8. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: K&M, 2003. 252 с.
9. Егоров Н.И. Физическая океанография. // Л.: Гидрометеиздат, 1974. 455 с.
10. Егоров Ю.М. Разработка установки для регистрации вариаций магнитного поля Земли в широком диапазоне частот. Автореферат дисс. М. 1965. 22 с.
11. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). //Л.: Наука, 1990. 159 с.
12. Жамалетдинов А.А. О дилатантно-диффузионной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по данным каротажа Кольской сверхглубокой скважины и результатам электромагнитных зондирований. // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов. Труды Всероссийской (с международным участием) конференции. Апатиты: Изд. Геологического института КНЦ РАН, 2009. С. 26-32.
13. Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // Докл. РАН. 2000. Т. 371. № 2. С. 235-239.
14. Жамалетдинов А.А., Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Колобов В.В., Шевцов А.Н. Опыт глубинного зондирования земной коры в полях мощных контролируемых источников и естественных вариаций АМТ-диапазона на профилях Яловозеро-Пулозеро и Уполокша-Поросозеро. // Инновационные электромагнитные методы геофизики (под редакцией акад. Е.П. Велихова). М.: Научный мир, 2012. С. 109-136.
15. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Корья Т. Частотное электромагнитное зондирование земной коры на территории Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса. // Известия РАН. Физика Земли. 2002. № 11. С. 54-68.
16. Идармачев Ш.Г., Абдулаев Ш.С.О. Оценка тензочувствительности электрического сопротивления горных пород в сейсмоактивных районах. // ДАН. 1998. Т. 361. № 5. С. 682-684.
17. 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.
18. Коломиец А.С. Результаты наклонномерных наблюдений в Мончегорске. // В кн.: Сейсмические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита. Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР. 1979. С. 82-91.

19. Короткова Т.Г. Методика и результаты изучения влияния лунно-солнечных приливов на МТЗ на примере обработки массива «BEAR». // В кн.: Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. С. 202-206.
20. Леонтович М.А. Приближенные граничные условия для электромагнитного поля на поверхности хорошо проводящих тел. // В кн.: Исследования по распространению радиоволн. II, Л.: Физматгиз, 1948. С. 5- 12.
21. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
22. Митрофанов Ф.П. (Гл. ред.). Геологическая карта Кольского региона в м-бе 1:500000. Апатиты. 1996.
23. Моги К. Предсказание землетрясений. // Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 382с.
24. Николаевский В.Н. Дилатансионная реология литосферы и волны тектонических напряжений. // Основные проблемы сейсмоструктоники. М.: Наука, 1986. С. 51-68.
25. Пархоменко Э.И., Бондаренко А.Т. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. // Л.: Недра, 1972. 279 с.
26. Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В. Геология рудных районов Мурманской области. // Апатиты. МПР РФ. 2002. 359 с.
27. Рикитаки Т. Предсказание землетрясений. // М.: Мир, 1979. 388 с.
28. Рокитянский И.И., Зыбин К.Ю., Рокитянская Д.А., Щепетнев Р.В. Магнитотеллурическое исследование массива на геофизических станциях Борок, Ловозеро и Петропавловск-Камчатский. // Электромагнитные зондирования и магнитотеллурические методы разведки. Л.: ЛГУ, 1963. С. 124-130.
29. Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. // Киев.: Наук. думка, 1981. 296с.
30. Сараев А.К., Пертель М.И., Малкин З.М. Проявление деформаций земной коры, вызванных приливами, в изменениях импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. // Уч. записки СПбГУ. № 433. Вопросы геофизики. Выпуск 35. СПб. 1998. С. 136-147.
31. Семенов В.Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М.: Недра, 1985. 133 с.
32. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
33. Терещенко Е.Д., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф. Влияние приливных эффектов на электромагнитное поле искусственного источника СНЧ-диапазона на Балтийском кристаллическом щите. // Физика Земли. 2014. № 1. С. 114-119.
34. Тихонов А.Н. Определение электрических свойств глубоких слоев земной коры. // ДАН СССР. 1950. Т. 73. № 2. С. 295-297.
35. Токарев А.Д., Жамалетдинов А.А., Васильев А.Н. Измерительный комплекс СЧЗ-95 для глубинных электромагнитных зондирований Земной коры с контролируемыми источниками поля. // Приборы и методика геофизического эксперимента. Мурманск. Изд. Кольского научного центра РАН, 1997. С. 85-90.
36. Фельдман И.С., Жамалетдинов А.А. Флюидная и тепловая модели электропроводности литосферы по лабораторным данным. // Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов. Труды Всероссийской (с международным участием) конференции. Апатиты: Изд. Геологического института КНЦ РАН. 2009. С. 100-107.
37. Шевцов А.Н. Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части земной коры Балтийского щита. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Санкт Петербург: Изд. СПбГУ, 2001. 21 с.
38. Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. // Geophysics. 1953. V. 18. N. 3. P. 605-635.
39. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., Palshin N.A., Smirnov M.Yu., Tokarev A.D., Asming V.E., Vanyan L.L., Vardaniants I.L. and the BEAR WG. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductivity in Fennoscandian shield // Earth, Planets, Space. 2002. N. 54. P. 535-558.
40. Lee C.D., Vine F.J., Ross R.G. (1983). Electrical conductivity models for the continental crust based on laboratory measurements on high-grade metamorphic rocks. Geophys. J.R. astr. Soc. V. 72. P. 353-371.
41. Mathews P.M., Dehaut V., Gibson J.M. Tidal station displacements // J. Geoph. Res. 1997. V. 102. NBD. P. 20469-20477.
42. Milson J. Field Gephysics. // London. University College, 1996. 187 p.
43. Nur A. Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of ts/tp travel times. // Bull. Seismol. Soc. Am., 62. 1972. P. 1217-1222.
44. Shevtsov A.N. The Inverse Problem on the Example of CSAMT Sounding in Central Finland. // Electromagnetic Induction in the Earth. Thesis of 14-th Workchop in Sinaia (Romania). 1998. P. 82.
45. Weidelt P. The Inverse Problem of Geomagnetic Introduction // Zeitschrift fur Geophysik. 1972. Band 38. P. 257-289.
46. Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Tokarev A.D., Korja T., Pedersen L. Experiment on the Deep Frequency Sounding and DC Neasurements in the Central Finland Granitoid Complex. // Electromagnetic Induction in the Earth. 14-th Workchop in Sinaia (Romania). 1998. P. 83.

Глава 3. Методика и техника возбуждения и регистрации КНЧ-СНЧ электромагнитного поля

Основные методы и особенности проектирования и тестирования современных индукционных датчиков магнитного поля

Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В.

ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород, svp@nirfi.sci-nnov.ru

Введение

Прецизионные измерения слабых магнитных полей составляют быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество применений, как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. К ним относятся многочисленные исследования в области фундаментальной физики, геофизики, геологии, космофизики, аэронавтики и т.д., а также, мониторинг магнитного поля Земли, постоянно осуществляемый несколькими международными сетями обсерваторий.

Среди многочисленных типов датчиков магнитного поля индукционные датчики выделяются по простоте конструкции, технологии изготовления, доступности материалов и эксплуатационной надежности. Для полноты и последовательности изложения кратко приведем основные принципы индукционного метода измерения магнитного поля.

Индукционный метод базируется на законе электромагнитной индукции Фарадея. Конструктивно индукционный датчик представляет собой катушку индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала (рис. 1), подключенную к малошумящему усилителю. Ферромагнитный сердечник искажает измеряемое магнитное поле, концентрируя в себе магнитные силовые линии и, в конечном итоге, увеличивая магнитный поток, сцепленный с витками измерительной катушки. По закону Фарадея напряжение U_d на выходе индукционного преобразователя для внешнего магнитного поля с амплитудой H_0 , меняющегося по гармоническому закону с циклической частотой ω , определяется следующим соотношением:

$$U_d = i\omega\mu_{эфф}\mu_0NH_0S \quad (1)$$

В уравнении (1) и на рисунке 1: i – мнимая единица, $\mu_{эфф}$ – эффективная магнитная проницаемость сердечника, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, N – количество витков в катушке, l – длина сердечника, l_k – длина катушки, $S = \pi d^2/4$ – площадь сечения сердечника, H_0 – амплитуда напряженности магнитного поля, d – диаметр сердечника, D – внешний диаметр катушки.

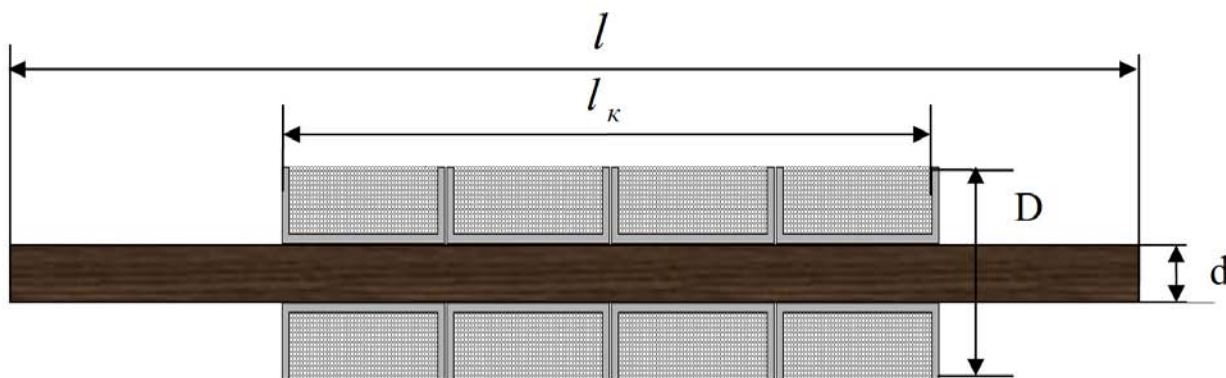


Рис. 1. Элементы конструкции индукционного датчика магнитного поля

1. Эффективная магнитная проницаемость сердечника

Эффективное значение магнитной проницаемости сердечника $\mu_{эфф}$ определяется не только магнитной проницаемостью материала сердечника μ , но в большей степени его геометрическими размерами. Этот факт можно пояснить, используя электростатическую аналогию или введением фиктивных магнитных зарядов. Сердечник поляризуется во внешнем поле H_0 , и поляризационные заряды, возникающие на его концах, приводят к уменьшению поля внутри сердечника. Точное решение этой задачи найдено лишь для сердечника в форме эллипсоида [4]:

$$\mu_{эфф}^* = \frac{\mu}{1 + K(\mu - 1)} \quad (2)$$

где K - геометрический фактор, определяемый выражением:

$$K = \left(\frac{d}{l}\right)^2 \left[\ln\left(2\frac{l}{d}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

Существует еще один неучтенный параметр – неоднородность распределения магнитного поля по длине датчика. Полученное решение соответствует центральному сечению сердечника, но по направлению к торцам индукция магнитного поля снижается. Многовитковая измерительная катушка обычно занимает значительную часть длины сердечника, поэтому для расчета датчика формул (2) и (3) недостаточно, необходимо выбирать некоторое усредненное значение $\mu_{эфф}$ по длине сердечника, занимаемого, катушкой (только тогда мы имеем право умножать на количество витков в формуле (1)).

Экспериментальная проверка подтвердила правильность и хорошую точность следующей инженерной формулы для средней действующей эффективной проницаемости $\mu_{эфф}$, полученной в работе [2]:

$$\mu_{эфф}^* = \frac{\mu_{эфф}^* \left[1 - 0.255 \left(\frac{l_k}{l} \right)^2 \right]}{1 + 0.975 \left(\frac{S}{l^2} \right) \left[\ln\left(\sqrt{\pi l^2 / S} \right) - 1 \right] (\mu_{эфф}^* - 1)} \quad (4)$$

Расчеты, выполненные по приведенным формулам, показывают, что требования, предъявляемые к магнитной проницаемости материала, не являются слишком жесткими, если только сердечник не очень длинный.

На рисунке 2 представлены результаты расчета зависимости величины $\mu_{эфф}$ от магнитной проницаемости материала μ для трех значений длины сердечника: 120 см (низкочастотный датчик), 60 см (средние частоты) и 30 см (высокие частоты). Диаметр сердечника во всех случаях равен 10 мм, а катушка занимает половину длины сердечника и расположена по центру.

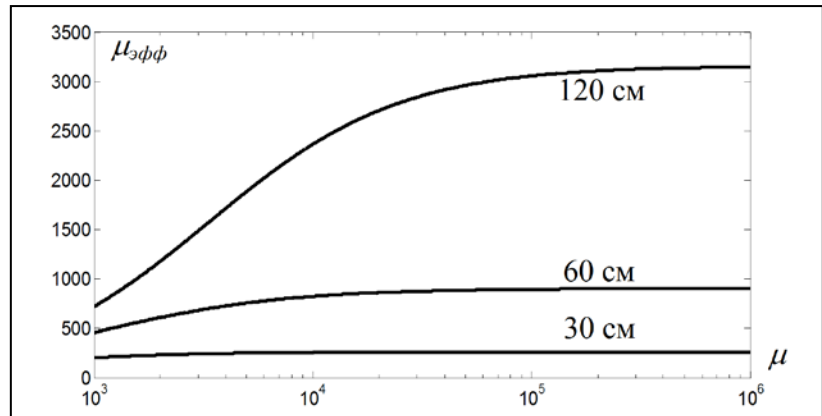


Рис. 2. Зависимость эффективной магнитной проницаемости сердечника $\mu_{эфф}$ от относительной магнитной проницаемости материала μ для $l = 120$ см, 60 см и 30 см (диаметр сердечника 10 мм).

Результаты расчета показывают, что требования к величине относительной магнитной проницаемости материала возрастают с увеличением отношения длины сердечника к его диаметру, и для достижения максимальной эффективной магнитной проницаемости

«длинного» сердечника с $L = 120$ см (низкие частоты) необходимо использовать материал с проницаемостью в десятки тысяч. Это необходимо в большей степени не для достижения максимальных значений, а для получения высокой стабильности этой величины при изменении температуры, влажности и других факторов.

Для обеспечения минимума собственных электромагнитных шумов датчика, связанных с активной составляющей его импеданса к сердечнику предъявляются требования минимизации тепловых потерь, вызываемых токами Фуко во всей полосе частот. Исторически сердечники для индукционных датчиков изготавливались из специальных марок низкопроводящих ферритов (сердечник из феррита использован, например, в датчиках MFS компании Metronix). Такие сердечники имеют минимальные тепловые потери, но значения магнитной проницаемости недостаточно велики (типичное значение $\sim 10\,000$).

Материалы с указанными выше свойствами в настоящее время вполне доступны. В тоже время наибольшее распространение получили слоистые сердечники, спрессованные из тонкой ленты магнитомягких (петля гистерезиса материалов должна быть как можно более узкой) аморфных сплавов. Такая конструкция сердечника обеспечивает минимальные тепловые потери. На рисунке 3 для примера представлена частотная зависимость начальной магнитной проницаемости для сердечников из аморфных магнитомягких сплавов ММ-1Н и ММ-11Н

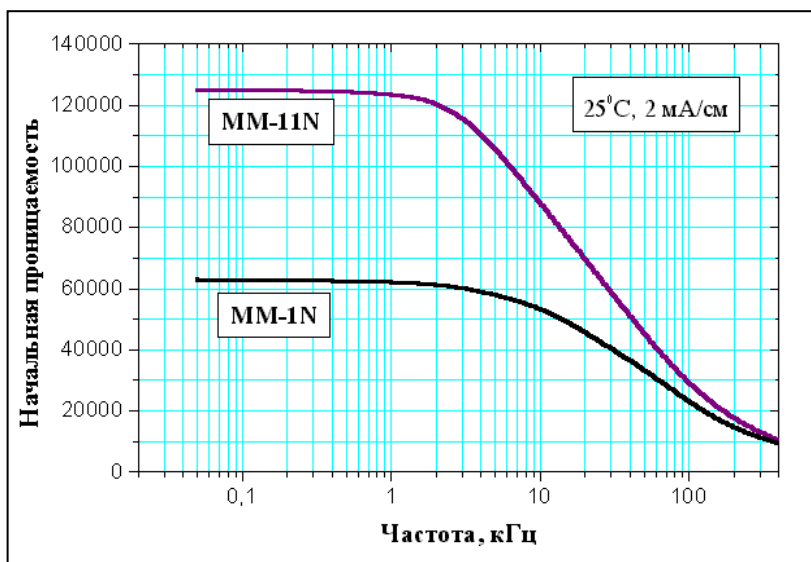


Рис. 3. Частотная зависимость начальной магнитной проницаемости μ для сердечников из сплавов

тушки всей длины сердечника $\chi = l_k / l$ соответственно. Расчеты показывают, что наиболее эффективным способом увеличения выходного сигнала датчика, а с ним и его чувствительности, является увеличение длины сердечника.

Естественным ограничителем здесь являются габариты и вес датчика. Проводить работы продолжительное время в полевых условиях громоздкими и тяжелыми датчиками крайне неудобно. Широко распространенные «низкочастотные» датчики имеют характерную длину около 1 м при весе до 10 кг. В тоже время, для стационарно устанавливаемых на научных полигонах и обсерваториях датчиков, их длину разумно увеличить.

Как показано на рис. 5, эффективная площадь сердечника, а с ней и уровень выходного сигнала датчика, растет и при увеличении диаметра сердечника. Но это не лучший способ повышения чувствительности, по-

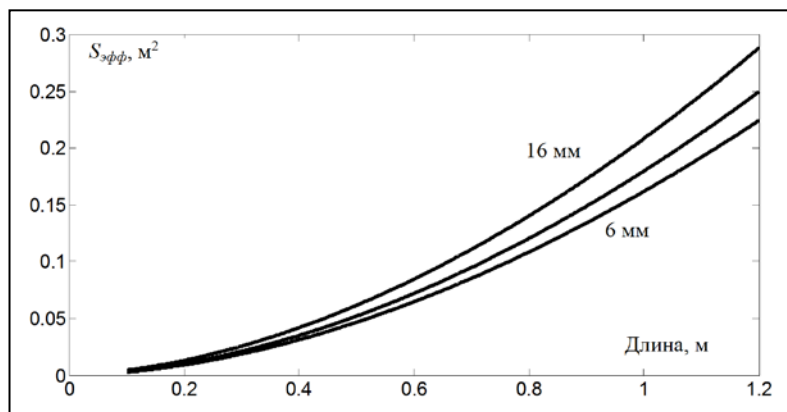


Рис. 4. Зависимость величины $S_{эфф}$ сердечника от его длины в метрах для диаметров сердечника 6, 10 и 16 мм

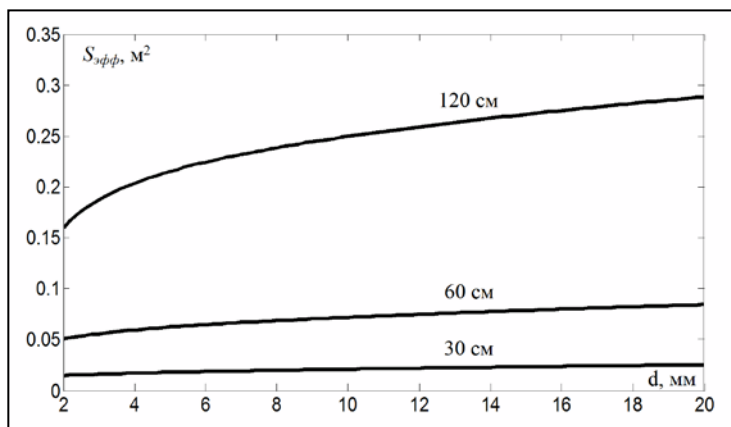


Рис. 5. Зависимость величины $S_{эфф}$ сердечника от его диаметра в миллиметрах для длины сердечника 120, 60 и 30 см.

(MELTA Ltd) [7]. Аналогичные изделия в настоящее время выпускаются и в России. До частот в десятки кГц они обеспечивают величины проницаемости материала в десятки – сотни тысяч. Многослойная конструкция сердечника при этом обеспечивает низкий уровень тепловых потерь.

В формулу (1) входит произведение $\mu_{эфф} S$, задающее степень концентрации сердечником магнитного поля, назовем его эффективной площадью сердечника $S_{эфф}$. Эта величина в основном определяется геометрическими размерами сердечника и катушки.

На рисунках 4, 5 и 6 графически представлены зависимости этой величины от длины и диаметра сердечника, а также от коэффициента заполнения витками ка-

скольку, во-первых, эта зависимость весьма слабая, и, кроме того, увеличение диаметра приводит к росту диаметра витков приемной катушки, увеличению ее сопротивления и, соответственно, шумов.

Рисунок 6 достаточно очевидно иллюстрирует тот факт, что при разработке датчика необходимо стремиться к минимальному значению коэффициента заполнения. В известных нам датчиках этот параметр варьируется в пределах $\chi = 0,3 - 0,6$. Входящее в формулу (1), количество витков N также является одним из наиболее значимых параметров датчика, определяющим его частотные свойства (ширину полосы), собственные шумы и предельную чувствительность. На кривых,

представленных на рисунках 4, 5 и 6, присутствуют области сильных и слабых зависимостей, что позволяет при разработке, варьируя эти параметры, получить оптимальные весогабаритные и метрологические характеристики датчиков.

2. Эквивалентная схема индукционного датчика

Амплитудно-частотная характеристика «идеального» датчика, согласно уравнению (1), представляла бы собой линейно растущую функцию при абсолютно плоской фазовой характеристике с постоянным сдвигом фаз/2. Однако, это справедливо только для самых низких частот диапазона. С повышением частоты начинают проявляться резонансные явления в электромагнитном контуре, образованном индуктивностью катушки датчика L и суммарной емкостью цепей датчика и входа усилителя $C = C_d + C_{BX}$.

На рисунке 7 представлена импедансная схема подключения датчика к усилителю, где L – индуктивность приемной катушки, R – ее активное сопротивление, C_d – распределенная межвитковая емкость катушки в сумме с другими паразитными емкостями датчика (емкость катушка – сердечник, катушка – экран и т.д.), C_{BX} и R_{BX} – входные емкость и сопротивление усилителя.

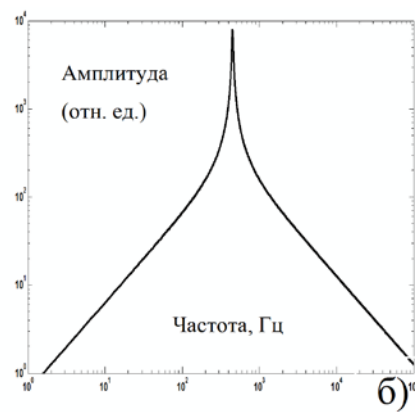
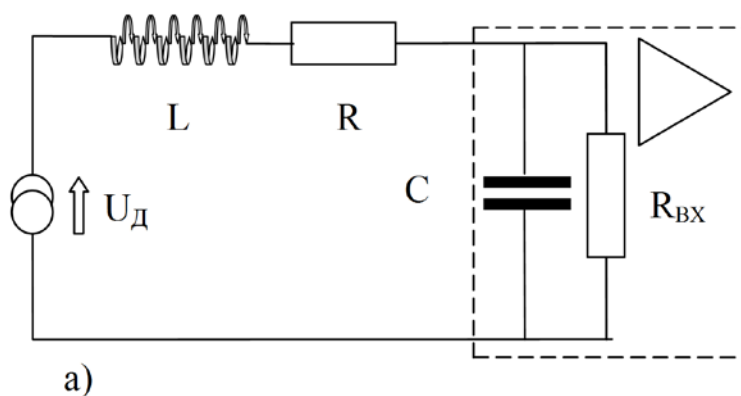


Рис. 7. а) Импедансная схема подключения датчика к усилителю, б) АЧХ датчика в относительных единицах.

При этом, входящие в схему элементы будут иметь следующие комплексные импедансы, образующие частотно-зависимый делитель напряжения:

$$Z_L = i\omega L; Z_R = R; Z_C = 1/i\omega C,$$

$$Z_{BX} = Z_C R_{BX} / (Z_C + R_{BX}) - \text{входной импеданс усилителя,} \quad (5)$$

а сигнал непосредственно на входе усилителя U_{BX} будет равен:

$$U_{BX} = \frac{Z_{BX}}{(Z_L + Z_R + Z_{BX})} U_d = P(\omega) U_d \quad (6)$$

где $P(\omega)$ – комплексный частотно зависимый коэффициент передачи.

Амплитудно – частотная характеристика описанных датчиков представляет собой резонансную кривую (рис. 7(б)) с линейным ростом амплитуды с частотой на низких частотах и спадом на частотах выше

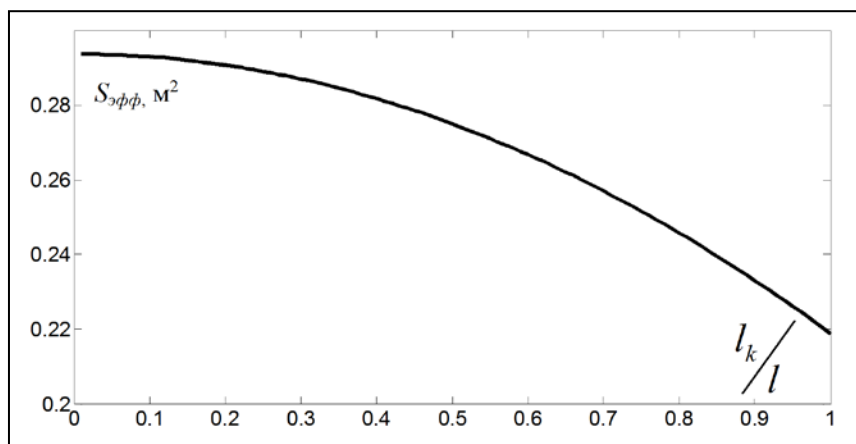


Рис. 6. Зависимость $S_{эфф}$ сердечника от коэффициента заполнения χ для сердечника длиной 120 см и диаметром 16 мм

резонансной, вызванным паразитной емкостью обмотки и входной емкостью усилителя. Окончательное выражение для амплитуды полезного сигнала датчика, приведенного ко входу усилителя при этом примет вид:

$$U_{BX} = P(\omega)\omega\mu_0\mu_{эфф}SNH_0 \quad (7)$$

При проведении измерений естественного электромагнитного поля в широком диапазоне частот такая характеристика дает некоторый выигрыш в отношении сигнал/шум, поскольку естественный электромагнитный шум имеет резко выраженную частотную зависимость вида $H_0 \sim 1/f^\alpha$ (в интересующем нас частотном диапазоне α меняется от 0,5 до 1,5), так что требования к динамическому диапазону приемной аппаратуры на низких частотах в этом случае резко снижаются [1, 3].

Однако, для того, чтобы получить плоскую амплитудно-частотную характеристику в широком частотном диапазоне, а также минимизировать влияние особенностей каждого конкретного датчика и повысить устойчивость их работы, применяют отрицательную обратную связь по полю. Этот прием использован практически во всех современных конструкциях индукционных датчиков.

На рисунке 8(а) приведена структурная схема такого подключения, а на рисунке 8(б) и 8(в) – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) датчика для различных коэффициентов усиления и различных значений сопротивления в петле обратной связи. На рисунке 8(г) представлен пример фазо-частотной характеристики датчика с обратной связью.

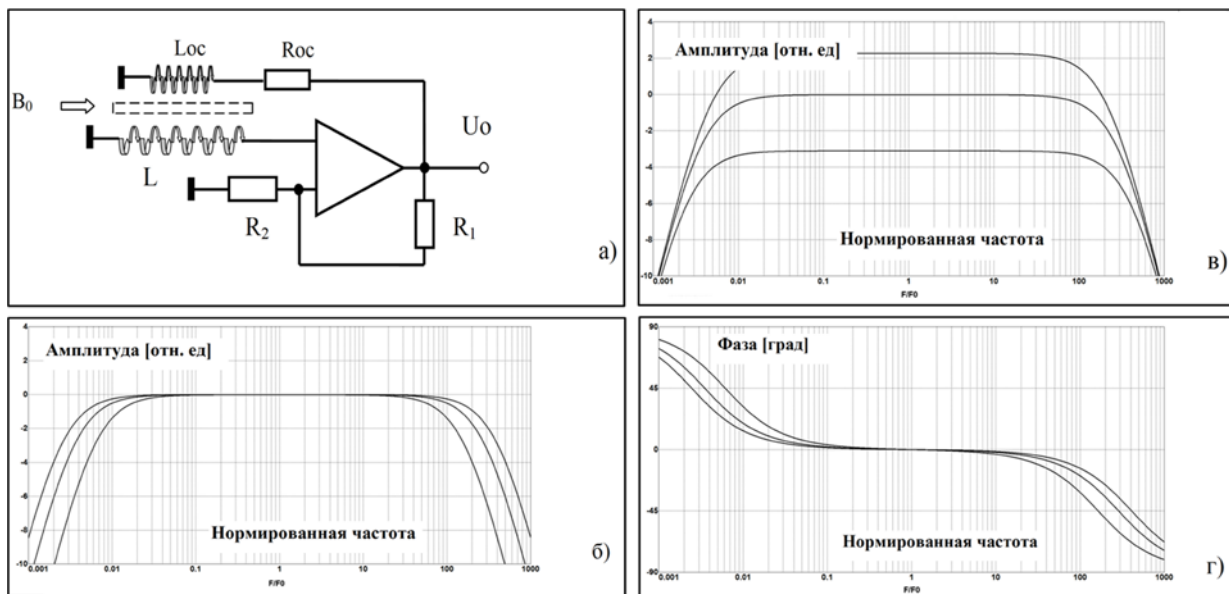


Рис. 8. Структурная схема датчика с обратной связью (а), АЧХ датчика при различных коэффициентах усиления k_{oc} (б) и различных сопротивлениях резистора R_{oc} (в) и ФЧХ датчика с обратной связью (г).

Как видно из рисунков 8(а-г), на АЧХ датчиков образуется обширный участок с плоской характеристикой, удобный при обработке результатов измерений, однако фазо-частотная характеристика датчика при этом становится нелинейной.

Влияние коэффициента усиления и величины резистора в цепи обратной связи на АЧХ датчика несколько различны. Более высокому коэффициенту усиления соответствует более широкая полоса пропускания.

Комплексная передаточная функция датчика с усилителем и обратной связью по полю обсуждается в ряде работ. Так, в работе [5] получено следующее выражение для чувствительности датчика (отношения амплитуды сигнала на выходе усилителя U_0 к амплитуде вариации индукции магнитного поля B_0):

$$\frac{U_0}{B_0} = \frac{-i\omega\mu_{эфф}NSk_{oc}}{1+i\omega\left(RC+\frac{k_{oc}M}{R_{oc}}\right)-LC\omega^2} \quad (8)$$

В формуле (8) $k_{oc} = 1+R_1/R_2$ – коэффициент усиления усилителя, R – активное сопротивление катушки датчика, C – суммарная емкость на входе усилителя, L – индуктивность приемной катушки датчика, R_{oc} –

сопротивление в цепи обратной связи и M – взаимная индуктивность приемной катушки датчика и катушки обратной связи, зависящая от их конструктивных параметров и соотношения числа витков.

Частота на рисунках 8 (а-г) нормирована относительно частоты резонанса:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \omega_0 = 2\pi f_0 \quad (9)$$

По краям от плоского участка амплитудно-частотной характеристики возникают низкочастотный и высокочастотный спады с частотами среза f_1 (в области низких частот) и f_2 (в области высоких частот). Они связаны с параметрами цепи следующим образом [5]:

$$f_1 = \frac{R_{oc}}{2\pi k_{oc} M}, \quad f_2 = \frac{k_{oc} M}{2\pi R_{oc} LC} \quad (10)$$

Для расчетов электротехнических параметров цепи обычно используется ряд полуэмпирических формул с различными поправочными коэффициентами. В обзорной статье [6], например, для расчета индуктивности катушки датчика и взаимной индуктивности приводятся следующие соотношения:

$$L = \mu_0 \mu_{эфф} \frac{N^2 S}{l} \lambda, \quad \lambda = 1,85 - 1,1\chi, \quad M = \mu_0 \mu_{эфф} \frac{N N_{oc} S}{l} \lambda, \quad (11)$$

где λ - поправочный коэффициент, χ - коэффициент заполнения сердечника, а N_{oc} – число витков в катушке обратной связи.

В указанных работах авторы приводят ряд эмпирических формул для расчета емкостей датчика. Однако, следует заметить, что основной вклад в суммарную емкость на входе предварительного усилителя вносит входная емкость самого усилителя и цепей защиты датчика от высокочастотных радиопомех, что дает в сумме около 100 пФ. Также относительно большую величину имеет емкость между приемной катушкой и экраном. Она, в зависимости от габаритов датчика, может составлять сотни пикофард. Межвитковые емкости катушки, а также емкость катушка – сердечник составляют единицы - десятки пикофард, и, в первом приближении, при расчете датчика ими можно пренебречь.

Тогда чувствительность датчика на плоском участке АЧХ можно оценить по следующей простой формуле [5]:

$$U_0 / B_0 = R_{oc} \frac{l}{\mu_0 N_{oc} \lambda} \quad (12)$$

Окончательное значение чувствительности датчика на плоском участке, требуемое для оптимального согласования электронной схемы датчика с устройством регистрации (АЦП) по динамическому диапазону, может быть получено дополнительным усилением в каскадах после петли обратной связи. Там же, при необходимости, может быть введена дополнительная частотная коррекция. Последние каскады предварительного усилителя обычно представляют собой буферные усилители с дифференциальным выходом.

3. Собственные шумы индукционного датчика

Необходимо отчетливо представлять себе, что чувствительность датчика, а также его АЧХ, являются вспомогательными параметрами, определяющими удобство работы с конкретным источником сигнала в определенном месте измерений, характеризующимся уровнем местных промышленных помех. Наиболее значимой характеристикой датчиков является их предельная чувствительность, то есть минимальный уровень сигнала, который способен зарегистрировать данный датчик. Эта характеристика в основном определяется уровнем собственных шумов датчика. В общем случае шумы прибора зависят от их источника и характеризуются своим частотным спектром. Рассмотрим кратко основные виды шумов и параметры, количественно характеризующие их величины.

Обратная связь действует одинаковым образом, как на полезный сигнал, так и на шумы на входе усилителя, поэтому, на отношение сигнал-шум, в первом приближении, она влияния не оказывает, и предельные параметры датчика могут быть получены из соотношения сигнал/шум на входе усилителя с использованием выражения (7) для амплитуды полезного сигнала.

Тепловой шум. Любой резистор на плате усилителя, сопротивления р-п переходов транзисторов, активное сопротивление датчика и т.д. генерируют некоторое шумовое напряжение в широком спектральном диапазоне (белый шум). Напряжение шума в незамкнутой цепи, определяется только активным

сопротивлением источника R , и при температуре T спектральная плотность тепловых шумов задается формулой:

$$u_T = (4kTR)^{1/2}, \quad (13)$$

где k - постоянная Больцмана ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град). При комнатной температуре имеем оценку $u_T = 1,27 \cdot 10^{-4} R^{1/2}$ мкВ/Гц^{1/2}, например, для $R = 10$ кОм получим среднеквадратичное напряжение шума порядка $u_T \sim 13$ нВ/Гц^{1/2}.

Тепловые шумы, связанные с тепловыми потерями в сердечнике, до последнего времени были основным фактором, ограничивающим возможности датчиков на высоких частотах. На высоких частотах, вследствие скин-эффекта, эффективная проницаемость сердечника становится комплексной, а тепловые потери определяются, так называемым, тангенсом угла потерь в сердечнике:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{пот}} = \left(\frac{\operatorname{Im}(\mu_{\text{эфф}})}{\operatorname{Re}(\mu_{\text{эфф}})} \right) \quad (14)$$

При этом в формулу импеданса датчика к сопротивлению катушки R добавляется величина $R_{\text{пот}} = \omega L \operatorname{tg} \delta_{\text{пот}}$, а соответствующее дополнительное шумовое напряжение, обусловленное тепловыми потерями в сердечнике, также вычисляется по формуле Найквиста (13) с заменой R на $R_{\text{пот}}$. Необходимо иметь ввиду, что для оценки таких потерь, необходимо использовать не паспортную величину тангенса потерь (поскольку она относится лишь к материалу, из которого изготовлен сердечник), а экспериментально измеренную величину для конкретного сердечника со своими геометрическими параметрами и технологическими особенностями.

Применение современных материалов при изготовлении сердечников (ферриты, слоистые сердечники из тонкой ленты аморфных сплавов) позволило значительно снизить влияние таких шумовых факторов. Измерения шумов, проведенные для использованных нами сердечников, показали, что вплоть до частот в сотни кГц, тепловыми шумами сердечника можно пренебречь.

Шумы предварительного усилителя. На рисунке 9 приведена эквивалентная шумовая схема датчика с предварительным усилителем. Здесь $e_{\text{ш}}$ обозначает источник шума напряжения, последовательный по отношению к входному сигналу, а $i_{\text{ш}}$ обозначает шум входного тока усилителя, который предполагается идеальным. Таким образом, полное напряжение шума усилителя, приведенное к его входу, будет равно (Z - здесь модуль полного импеданса датчика):

$$u_{\text{ш}} = [e_{\text{ш}}^2 + (Z i_{\text{ш}})^2]^{1/2} \quad (15)$$

Слагаемые в скобках (15) – это входное напряжение шума усилителя и напряжение шума, порождаемое прохождением входного шумового тока усилителя через импеданс источника. При малом сопротивлении источника сигнала преобладает шум напряжения $e_{\text{ш}}$, а при большом – шум тока $Z i_{\text{ш}}$. Величины $e_{\text{ш}}$ и $i_{\text{ш}}$

представляют собой характеристики транзисторов или ОУ, используемых при построении предварительных усилителей и могут быть выбраны оптимальным образом путем подбора элементной базы и рабочих токов.

Поскольку, индукционный датчик относится к источнику с большим внутренним сопротивлением, то в качестве первых элементов предварительного усилителя используют специальные полевые транзисторы с очень малым значением шумового тока (единицы фА/(Гц)^{1/2}). Согласование датчика по шумам при этом сводится к выбору величины входного сопротивления усилителя, равным его шумовому сопротивлению $R_{\text{вх}} = e_{\text{ш}} / i_{\text{ш}}$.

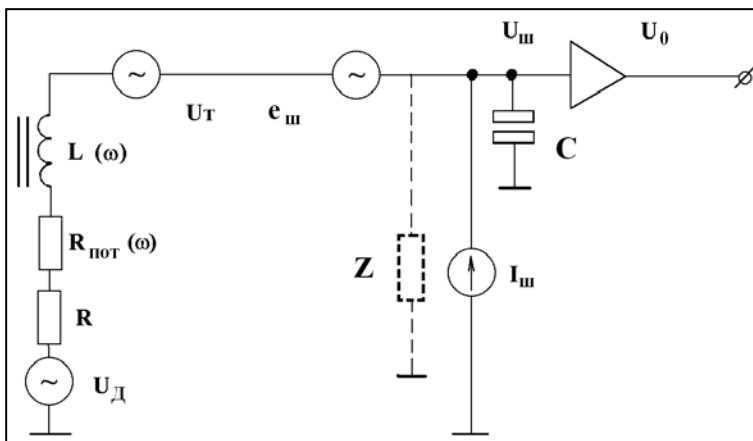


Рис. 9. Эквивалентная шумовая схема датчика с предварительным усилителем.

Естественно, что это можно сделать только в узком диапазоне частот, например, там, где наблюдается минимум в спектре естественного геомагнитного поля, искаженного частотной характеристикой индукционного датчика. Наличие такого минимума в диапазоне частот 0,1 – 10 Гц было зафиксировано при обобщении многолетних экспериментальных данных [1, 3]. На рисунке 10 эти

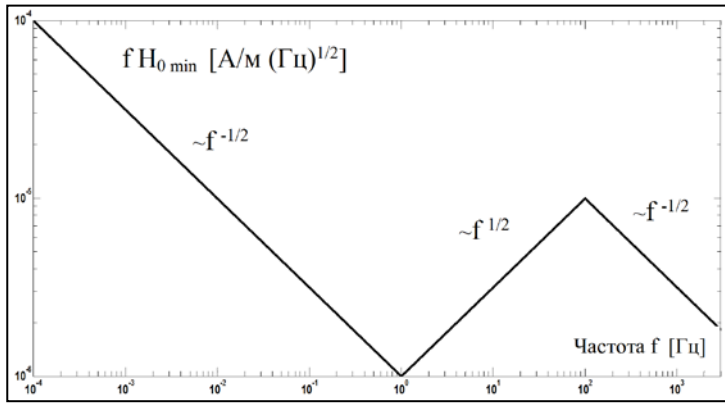


Рис. 10. Модель спектра минимального уровня геомагнитного фона, приведенная к входу предварительного усилителя. АЧХ датчика учтено фактором f .

совершенствование схмотехники таких усилителей с применением новой элемент-ной базы позволяет снизить шумы напряжения до величин порядка единиц $\text{нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$. К сожалению, МДМ-усилители имеют большие токовые шумы (шумы переключения), что приводит к высоким уровням шума датчика на высоких частотах. В современных датчиках данные усилители делают отключаемыми.

На высоких частотах (выше сотен герц) современные линейные усилители имеют характерные шумы напряжения $1,5 - 2 \text{ нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$ при токовом шуме единицы $\text{фА}/(\text{Гц})^{1/2}$. Для сравнения, токовые шумы МДМ-усилителя составляют сотни $\text{фА}/(\text{Гц})^{1/2}$. Так как все упомянутые виды шумов не коррелированы, то полное шумовое напряжение $U_{\text{ш}}$ определяется следующим образом:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 Z^2 + 4kT(R + R_{\text{ном}})} \quad (16)$$

Предельная чувствительность магнитометра с усилителем определяется условием равенства величин полезного сигнала на входе усилителя и полного шума. Тогда минимальный регистрируемый сигнал можно вычислить по формуле:

$$B_{\text{мин}}(f) = \frac{(e_{\text{ш}}^2 + i_{\text{ш}}^2 Z^2 + 4kT(R + R_{\text{ном}}))^{1/2}}{2\pi f \mu_{\text{эфф}} NS} \quad (17)$$

Хотелось бы также отметить, что до настоящего времени не существует общепринятых методик проверки такой основополагающей характеристики датчика, как предельная чувствительность - минимального уровня полезного сигнала, который может зарегистрировать данный датчик. Этот параметр определяется уровнем собственных шумов датчика, его экспериментальная проверка сталкивается с рядом технических проблем. Методики таких проверок, как правило, в описаниях не приводятся, так что указываемые в рекламных материалах параметры чаще всего остаются на совести разработчиков и порой вызывают сомнения при использовании датчиков в практике измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-05-12044-офи-м).

Список литературы

1. Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д. и др. Флуктуации электромагнитного поля земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука, 1972. 195 с.
2. Зимин Е. Ф., Кочанов Э. С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
3. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. М.: Наука, 1985. – 200 с.
4. R.M. Bozorth, Ferromagnetism. Van Nostrand. Princeton. 1951.
5. H. C. Séran and P. Fergeau., An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research., Rev. Sci. Instrum. 76. 044502 (2005); <http://dx.doi.org/10.1063/1.1884026> (10 pages)
6. Slawomir Tumanski., Induction coil sensors—a review., Measurement Science and Technology. 2007.V. 18 N. 3.
7. <http://www.ferrite.com.ua/amorphous/>

результаты отображены графически. Влияние собственных шумов наиболее сильно проявляется в области минимума на частотах $f \sim 1 \text{ Гц}$.

Различные источники шума распределены по частотному диапазону не равномерно. Так, в самом нижнем участке частотного диапазона преобладают шумы напряжения усилителя и тепловые шумы активного сопротивления датчика.

До недавнего времени основным фактором, ограничивавшим возможности датчиков на низких частотах, считался фликкер-шум линейных усилителей. Для преодоления этих проблем применяются МДМ-усилители (в зарубежной литературе «чопперы»), широко используемые современными разработчиками. Непрерывное

Индукционные датчики для наземных геофизических исследований IMS 007, IMS 008 и IMS 009. Технические параметры и примеры использования

**С.В. Поляков¹, Б.И. Резников¹, Ю.В. Шлюгаев¹, А.В. Щенников¹,
Е.А. Копытенко^{2,3}, Б.В. Самсонов³**

¹ ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород, svp@nirfi.sci-nnov.ru

² СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, e.kopytenko@gmail.com

³ ООО «ВЕГА», Санкт-Петербург, boris.samsonov@vega-geophysics.com

Введение

В последние годы в результате совместных работ ФГБНУ НИРФИ и ООО «ВЕГА» была разработана линейка современных малошумящих индукционных магнитометров: низкочастотный датчик IMS-008 и среднечастотные широкополосные IMS-007 и IMS-009. Следует отметить, что деление на частотные диапазоны является условным

В основе разработки лежит многолетний опыт специалистов, помноженный на использование современных материалов и элементной базы. Данные магнитометры в настоящее время успешно используются как при проведении обсерваторских наблюдений, так и в полевых работах, в том числе в жестких условиях пустыни и крайнего Севера.

Таблица 1

Датчик	IMS-007	IMS-008	IMS-009	Примечание
Частотный диапазон	0.001 Гц – 10 кГц	0.0001 Гц – 1 кГц	0.001 Гц – 10 кГц	Возможность отключения «чоппера»
Частотная характеристика	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0.001 Гц – 4 Hz) линейная	(2 Гц – 1 кГц) плоская (0.0001 Гц – 2 Hz) линейная	(4 Гц – 10 кГц) плоская (0.001 Гц – 4 Hz) линейная	
Измеренный уровень шума	-	10^{-2} нТ/√Гц на 0.01 Гц 10^{-4} нТ/√Гц на 1 Гц $5 \cdot 10^{-7}$ нТ/√Гц на 1 кГц	$2 \cdot 10^{-2}$ нТ/√Гц на 0.01 Гц $2 \cdot 10^{-4}$ нТ/√Гц на 1 Гц 10^{-6} нТ / √Гц на 1 кГц	
Чувствительность	-	0.8 (В / нТ) × Гц (0.0001 Гц – 2 Hz) 1.6 В / нТ (2 Гц – 1 кГц)	0.2 (В / нТ) × Гц (0.001 Гц – 4 Hz) 0.8 В / нТ (4 Гц – 10 кГц)	
Диапазон выходного сигнала	+/- 10 В	+/- 10 В	+/- 10 В	+/- 2.5 В (опция)
Потребляемый ток	60 мА (при 12 В)	65 мА (при 12 В)	40 мА (при 12 В)	
Размеры	Длина: 800 мм Диаметр: 75 мм	Длина: 1240 мм Диаметр: 75 мм	Длина: 800 мм Диаметр: 65 мм	
Вес	6 кг	8 кг	5 кг	
Рабочая температура	от -40 до +60 °С	от -40 до +60 °С	от -40 до +60 °С	

В таблице 1 приведены основные характеристики магнитометров IMS-007, IMS-008 и IMS-009. Низкие собственные шумы магнитометров позволяют при использовании градиентного метода измерений [5] регистрировать сигналы, амплитуды которых много ниже составляющих естественного шумового фона. При совместном использовании магнитометры позволяют перекрыть диапазон частот от 0.0001 Гц до 10 кГц. Такая широкая полоса со стороны высоких частот достигнута благодаря использованию слоистых сердечников из аморфного сплава, секционированных катушек и других конструктивных особенностей, а со стороны низких частот - использованием малошумящих МДМ - усилителей (усилители типа модулятор – демодулятор или «чоппер»). Встроенная функция калибровки облегчает пользователям выполнение проверки передаточной функции магнитометра непосредственно в условиях эксперимента.

Датчики размещены в прочных водонепроницаемых стеклотекстолитовых трубах диаметром 75 мм. Для повышения защиты от механических воздействий корпус покрыт термоусаживаемой трубкой. С обеих сторон корпус герметично закрыт заглушками, на одной из которых установлен разъем для подключения

соединительного кабеля. Малошумящий предварительный усилитель с дифференциальным выходом размещен в общем корпусе с преобразователем и подключаются кабелем через разъем к системе регистрации и питания.

1. Методики проведения проверок и испытаний датчиков

Проверки и испытания датчиков включают в себя лабораторные измерения шумов усилителя, предварительные грубые настройки их чувствительности и АЧХ. Окончательные настройки параметров датчиков выполняются на экспериментальных полигонах с низким уровнем промышленных помех. В качестве источника поля известной величины используются кольца Гельмгольца либо излучатель типа магнитного диполя, располагаемый в 20 – 50 м от закрепленных на стендах датчиков.

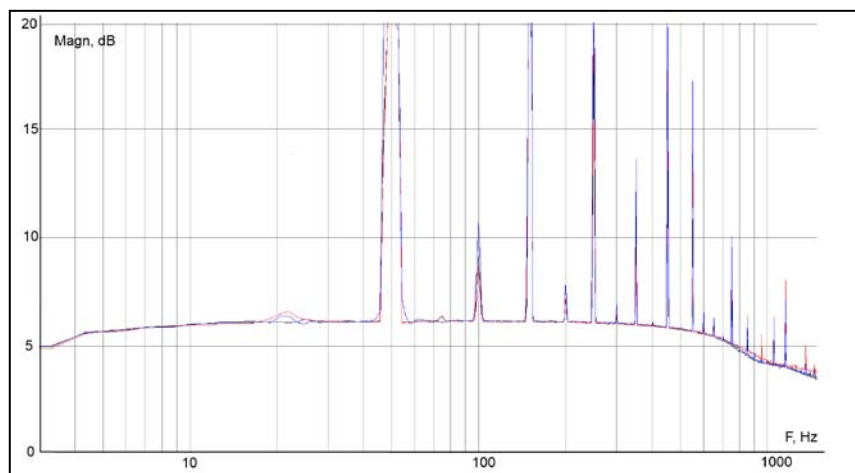


Рис. 1. АЧХ трех датчиков IMS-008, измеренные с применением белого шума.

Точные измерения чувствительности, АЧХ и ФЧХ датчиков производятся по набору частот. Для выявления возможных особенностей характеристик отдельных экземпляров во всем частотном диапазоне датчики проверяются сигналом белого шума. Калибровка с использованием белого шума является удобным и быстрым методом качественного сравнения характеристик датчиков во всей полосе частот. На рисунках 1 и 2 приведены результаты тестирования трех экземпляров датчиков IMS-008 с применением белого шума.

Испытания на полигоне завершаются проведением параллельного тестирования, когда серия одинаковых датчиков крепится на стенде или закапывается в грунт параллельно друг другу, при этом производится одновременная запись естественного фона или искусственного сигнала. Такие проверки выполняются также в полевых условиях перед началом любых масштабных геофизических работ по методу МТЗ.

На рисунке 3 представлен результат спектральной обработки естественных сигналов с шести датчиков IMS-007 после параллельного теста.

Помимо стандартных лабораторных и полигонных испытаний с измерением амплитудной и фазовой частотных характеристик датчиков, несколько образцов магнитометров IMS-008 прошли метрологические тестирования на базе Отраслевого научно-методического метрологического центра ФГУНПП «Геологоразведка». Целью экспериментальных работ было уточнение АЧХ и ФЧХ датчиков, а также попытка определить реальный порог чувствительности разработанных индукционных магнитометров и линейность их коэффициента преобразования. Испытания проводились в несколько этапов с использованием экранированной двухкомпонентной меры магнитной индукции ЭДММИ.

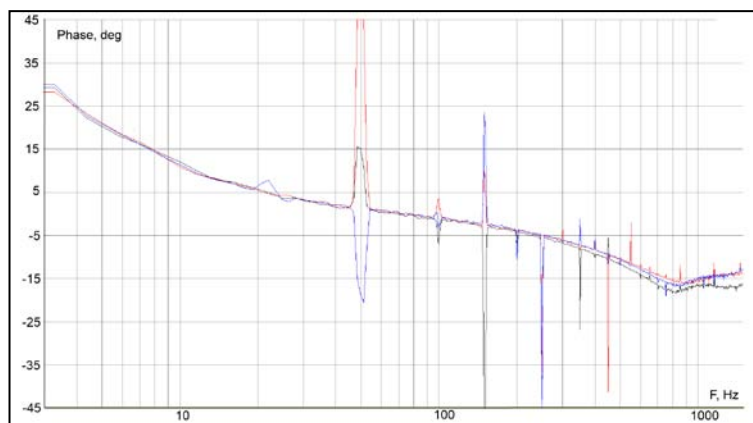


Рис. 2. ФЧХ трех датчиков IMS-008, измеренные с применением белого шума

Немагнитный павильон ФГУНПП «Геологоразведка» находится в 25 км от Санкт-Петербурга и построен с соблюдением всех нормативов, предъявляемых к строениям такого типа [4]. Калибровочная система установлена на изолированном от пола павильона цементном основании. Массивная алюминиевая плита, на которой смонтированы кольца Гельмгольца, изолирована от фундамента с помощью сложной системы гашения механических вибраций.

В зоне однородного магнитного поля, формируемого кольцами Гельмгольца, расположен измерительный компенсационный феррозондовый магнитометр и многослойный пермаллоевый экран с дополнительными

калибровочными обмотками. Такая установка позволяет подавлять внешние магнитные поля в широком диапазоне частот в области, предназначенной для тестируемого объекта более чем в тысячу раз.

Для испытуемого магнитометра в «очищенном» объеме, одновременно с подавлением внешних полей, генерируется магнитное поле заданной частоты и величины. Результаты измерений АЧХ и ФЧХ магнитных датчиков

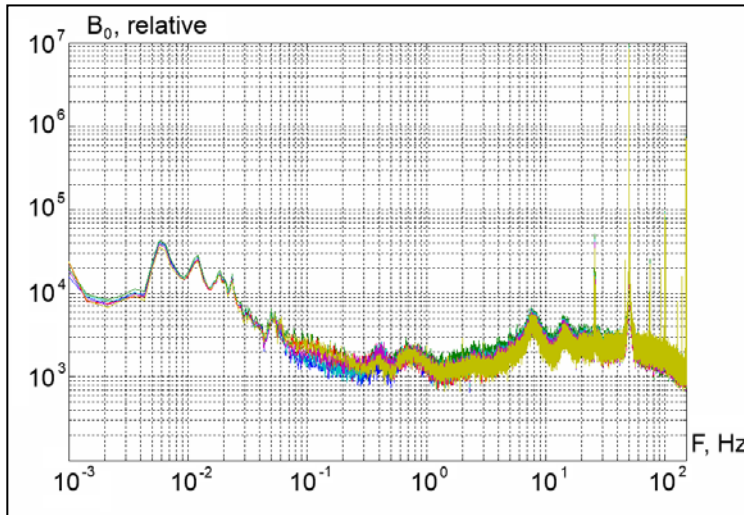


Рис. 3. Спектральная плотность естественного э/м поля сигналов, измеренная шестью параллельно установленными датчиками.

уровня полезного сигнала, который может быть зарегистрирован данным магнитометром. Этот параметр определяется уровнем собственных шумов датчика.

Следует отметить, что общепринятых методик такой проверки до настоящего времени не существует. Оценку этих характеристик, например, можно сделать произведя вычитание выходных сигналов двух или нескольких датчиков после проведения параллельного теста. Временной ряд, полученный вычитанием сигналов двух параллельных датчиков, представляет собой собственный шум датчика и некоррелированную помеху, например, паразитные сигналы ветра, дождя и сейсмик различного происхождения, таким образом, можно получить оценку сверху (несколько заниженную) для предельной чувствительности магнитометра.

В нашем случае, на стенде, при значительном подавлении существующих промышленных помех, а также вариаций магнитного поля естественного происхождения, удалось произвести прямую оценку собственных шумов испытуемого образца. Средняя спектральная плотность шумов магнитного датчика IMS-008 в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц не превышала $12 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$.

На рисунке 5 приведен пример измерения тестового сигнала с частотой 7.8 Гц и величиной 1 пТл на фоне шумов магнитного датчика IMS-008, помещенного в экранированную двухкомпонентную меру магнитной индукции ЭДММИ. Шумовой сигнал около 2.4 Гц соответствует собственной механической частоте колебаний метрологической установки.

Необходимо отметить, что датчики IMS-008 в течение 2.5 лет непрерывно работали при проведении обсерваторских наблюдений. После окончания работ были проведены измерения АЧХ и ФЧХ датчиков. Выяснилось, что характеристики сохранились с очень большой точностью (примерно 1%). Результаты испытаний и долговременная работа в различных климатических условиях показали, что датчики IMS-008 и

датчиков IMS-008 представлены на рисунке 4. Также рисунке 4 помимо характеристик датчиков IMS-008 и IMS-009 для сравнения приведены частотные характеристики известных в России датчиков MTC-50 фирмы Phoenix и феррозондового магнитометра.

Измерения коэффициента преобразования магнитного датчика в зависимости от уровня входного сигнала производились на нескольких частотах рабочего диапазона. Отклонение коэффициента преобразования от своего среднего значения, являющегося характеристикой линейности измерительной системы, не превышало 0.25% в диапазоне входных сигналов от 5 пТл и выше.

Наибольшие сложности возникают при измерениях такой основополагающей характеристики датчика, как его предельная чувствительность, т.е. минимального

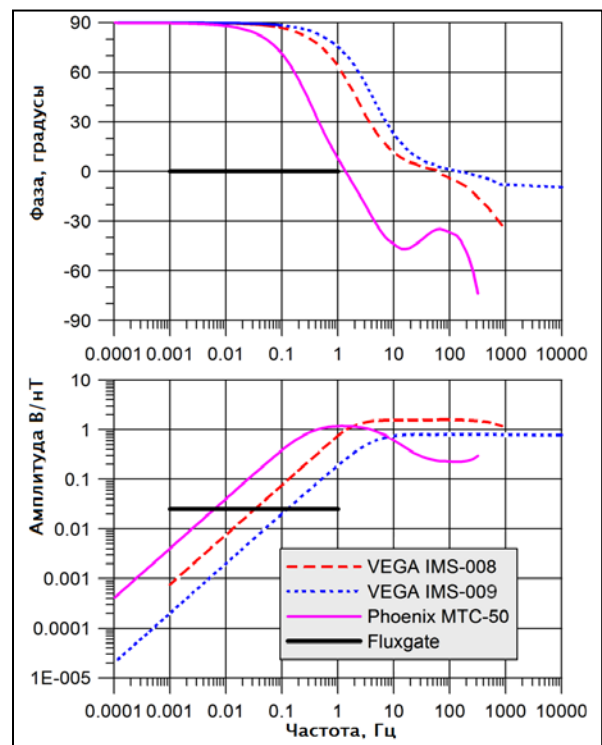


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ магнитометров IMS-008 и IMS-009.

IMS-009 обладают высокой стабильностью параметров, исключительно низкими характеристиками шума, очень малым температурным дрейфом, а также стабильной передаточной функцией по температуре и времени.

2. Примеры использования датчиков

В настоящее время индукционные магнитные датчики нашли широкое применение в различных областях науки и техники в основном благодаря высокой чувствительности и широкополосности при относительной простоте использования. В сравнении с другими прецизионными высокочувствительными магнитометрами, такими как СКВИДы и квантовые приборы, которые требуют создания непростых дополнительных условий для их функционирования, индукционные магнитометры очень нетребовательны к внешним обстоятельствам. Благодаря этим качествам, они практически не заменимы при проведении современных полевых геофизических и электро-разведочных работ.

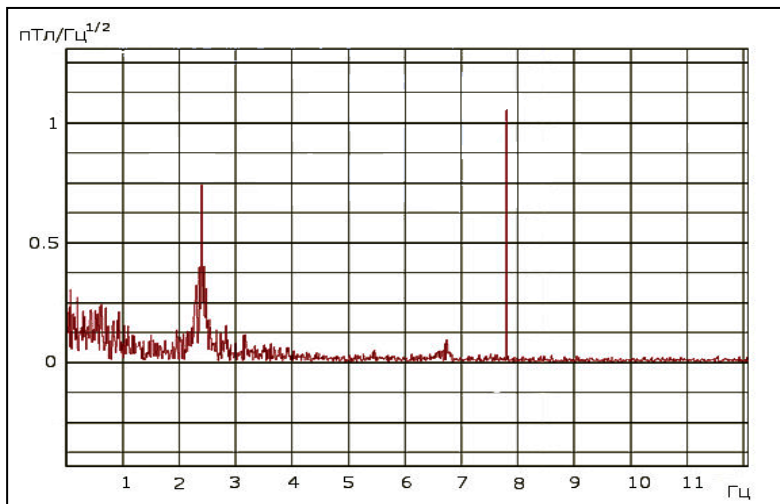


Рис. 5. Шумовой спектр магнитометра IMS-008.

Указанные свойства дали возможность проводить электромагнитные зондирования Земной коры от первых сотен метров до десятков километров используя лишь один тип датчиков, что существенно сократило как количество приборов, вывозимых для проведения полевых работ с одной стороны, а с другой стороны увеличило производительность труда, благодаря уменьшению количества требуемых измерений. Одним из основных направлений использования индукционных магнитометров в разведочной геофизике является поиск геотермальных вод методом широкополосного МТЗ. Ряд примеров таких работ, выполненных датчиками IMS-007, можно найти на сайте [18].

На рисунке 6 приведена псевдо трехмерная картинка распределения кажущегося сопротивления в районе выхода на поверхность геотермальных вод, построенная по результатам площадных измерений, выполненных совместно компаниями Dewhurst Group (США) и ВЕГА (Россия) с помощью индукционных магнитометров производства российской компании в штате Невада (США).

В работе [1] приводятся результаты, полученные с использованием индукционных датчиков IMS-008 при проведении электромагнитных зондирований с контролируемым источником. Целью исследования было изучение глубинного строения литосферы и прослеживание газо-нефтеперспективных горизонтов в осадочном чехле Западно-Сибирской платформы на территории ЯНАО.

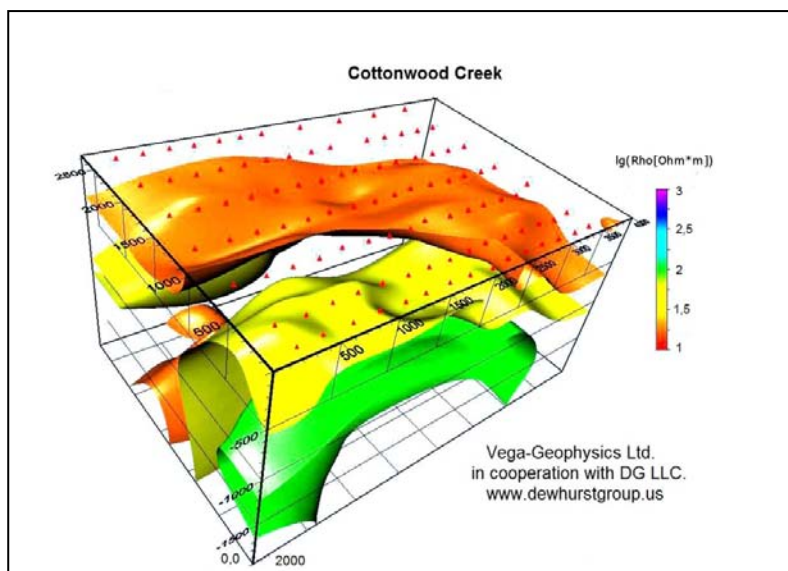


Рис. 6. Трехмерная картинка распределения кажущегося сопротивления в районе выхода на поверхность геотермальных вод, полученная с использованием датчиков IMS-007.

Необходимо отметить, что целый ряд академических научно-исследовательских задач по изучению низкочастотного электромагнитного поля Земли невозможен без использования индукционных магнитометров.

На рисунке 7, в качестве примера, приведена суточная спектрограмма вариаций магнитного поля в диапазоне частот до 16 Гц, зарегистрированная датчиками IMS-008 осенью 2012 года на полигоне «Новая жизнь» (Нижегородская область). На рисунке отчетливо проявляется частотно-временная структура геомагнитного поля с двумя шумановскими резонансами, а также хорошо прослеживаются такие тонкие особенности электромагнитного поля, как резонансная структура спектра (РСС), определяемая ионосферным альвеновским резонатором.

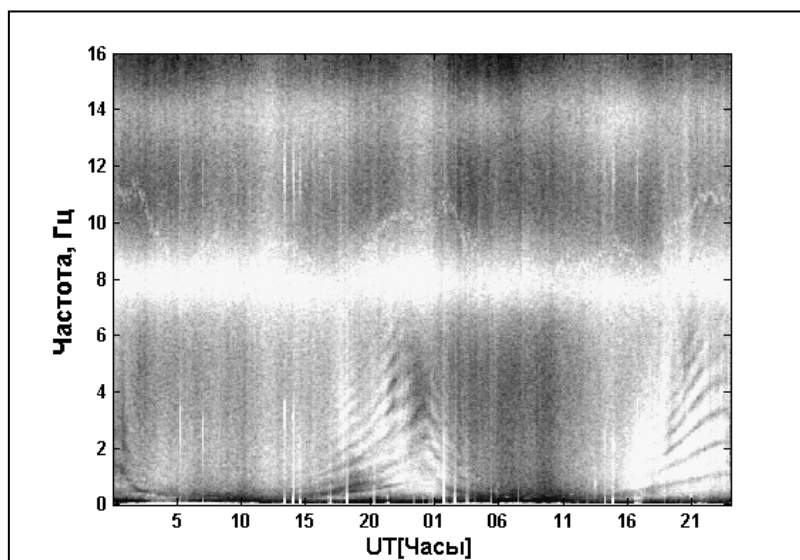


Рис. 7. Суточная спектрограмма, полученная датчиками IMS-008.

По своей природе и природе вещей (частотная характеристика индукционного магнитометра и типичный спектр естественного шумового фона) индукционный датчик имеет наименьшее значение коэффициента сигнал – шум на частотах порядка 1 Гц, то есть, как раз на частотах, где наблюдается РСС. Это означает, что регулярная регистрация РСС является качественным тестом индукционного датчика на предельную чувствительность. Сама по себе РСС несет информацию о структуре верхней ионосферы и может быть использована для ее диагностики. По этой причине в настоящее время РСС активно изучается как в России, так и за рубежом.

Таким образом, задачи мониторинга естественного электромагнитного

поля Земли для различных целевых объектов наиболее успешно могут быть решены с использованием чувствительных, широкополосных и удобных в обращении индукционных датчиков. Дополнительные конкретные примеры результатов, полученных с применением датчиков IMS-007, IMS-008 и IMS-009 можно найти так же в работе [3].

Приложение

Современные индукционные магнитометры

Прецизионные измерения слабых магнитных полей составляют быстро развивающийся раздел метрологии, находящий множество применений, как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. К первым относятся многочисленные исследования в области фундаментальной физики, геофизики, геологии, космофизики, астрономии и т.д. Ко вторым - мониторинг магнитного поля Земли, постоянно осуществляемый несколькими международными сетями обсерваторий.

Среди многочисленных типов датчиков магнитного поля индукционные датчики выделяются по простоте конструкции, технологии изготовления, доступности материалов и эксплуатационной надежности. Они представляют собой индукционную катушку с сердечником из ферромагнитного материала или воздушную много - или одновитковую рамку без сердечника.

В последнее время достигнут значительный прогресс в области повышения метрологических характеристик индукционных магнитометров и расширения частотного диапазона их работы. Основным фактором, ограничивавшим возможности индукционных датчиков на частотах ниже единиц Герц, являлся фликкер-шум линейных усилителей. Для преодоления этой проблемы разработчики применяют параметрические нелинейные усилители типа модулятор-демодулятор (МДМ). Это позволило в конечном итоге решить проблему собственных шумов усилителя на низких частотах.

На современном международном рынке средств магнитометрии индукционные датчики представлены достаточно широко. Ниже приведено краткое описание наиболее известных моделей датчиков, получивших широкое распространение при проведении исследовательских и поисковых работ в России.

1. Магнитометры фирмы Metronix [6].

Немецкая фирма Metronix (Метрониक्स) предлагает линейку из двух широкополосных датчиков: «низкочастотного» датчика MFS-06 [7] и «высокочастотного» MFS-07. Технические характеристики датчика MFS-06 достаточно уникальны в своем классе, что позволяет использовать его в широком круге задач. Из-за наличия отрицательной обратной связи по полю датчик обладает широким частотным диапазоном (от 1/4000 Гц до 10 кГц), высокой степенью линейности преобразования, сверхнизкими шумами, стабильностью передаточной функции, а также возможностью проведения внутренней калибровки. Плоский участок АЧХ находится в диапазоне от 4 Гц до, примерно, 8 кГц. Длина датчика 125 см при диаметре 75 мм и весе 8,5 кг.

«Высокочастотный» индукционный магнитометр MFS-07 [8] в основном предназначен для измерений в диапазоне звуковых частот при аудиоманнитотеллурическом зондировании (АМТЗ) и зондировании Земли в диапазоне звуковых частот с управляемым источником. Тем не менее, устройство

работает в широком диапазоне частот – от 0,001 Гц до 50 кГц и может применяться в стандартных магнитотеллурических измерениях.

Датчик MFS-07 обладает исключительно низкими шумами, малым температурным дрейфом входного напряжения смещения и входного тока смещения, а также стабильной передаточной функцией по температуре и времени. Встроенная функция калибровки облегчает выполнение пользователем калибровки датчика в полевых условиях или испытания его передаточной функции. Дифференциальный тестирующий сигнал может быть подан на калибровочный вход датчика. Плоский участок АЧХ начинается с 32 Гц. Датчик имеет габариты 80 см в длину при диаметре 75 мм и весит 5,5 кг.

2. Магнитометры фирмы PHOENIX (Феникс) [9,10].

Семейство индукционных магнитометров компании Феникс представлено двумя типами широкополосных датчиков - низкочастотным МТС-50 и высокочастотным АМТС-30. Датчики предназначены для работы в составе магнитотеллурических установок производства компании Феникс. Приведенные на сайте компании технические характеристики указанных датчиков, весьма обрывочны.

Низкочастотный датчик МТС-50 имеет в длину 1410 мм при диаметре 60 мм. Частотный диапазон датчика от 0.0002 Гц до 400 Гц. Как можно понять из приведенных на сайте компании амплитудных и фазовых характеристик, у датчика отсутствует обратная связь по полю, что приводит к существенным неоднородностям АЧХ и ФЧХ, затрудняет обработку данных и ухудшает стабильность его характеристик. Высокочастотный датчик АМТС-30 имеет в длину 820 мм при диаметре 60 мм. Частотный диапазон датчика от 1 Гц до 10 кГц.

3. Магнитометры американской фирмы Zonge [11].

Продукция представлена тремя типами датчиков. Датчик ANT/4 - самый низкочастотный в серии. Он имеет длину 138 см при диаметре 4,8 см и весе 6,2 кг. На плоском участке АЧХ 0,1 Гц – 1 кГц датчик имеет чувствительность 100 мВ/нТл. Датчик ANT/6 - среднечастотный, широкополосный при длине 91 см и диаметре 4,8 см весит 3,2 кг, плоский участок АЧХ имеет диапазон от 10 Гц до 10 кГц. Датчик ANT/5 – самый маленький и легкий в серии (61 см при диаметре 3,6 см и весе 1,5 кг) предназначен для измерений в диапазоне 0,25 Гц – 10 кГц.

4. Магнитометры американской фирмы Schlumberger [12].

Приборы представлены линейкой из четырех датчиков BF-4, BF-6, BF-7 и BF-10 предназначенных для работы в различных диапазонах частот. Самый низкочастотный из них BF-4 имеет плоский участок АЧХ в диапазоне от 1 Гц до 700 Гц (рабочий диапазон 0,0001 Гц – 700 Гц), при длине 142 см и диаметре 6 см весит 7,9 кг. Среднечастотный образец BF-10 имеет частотный диапазон от 0,1 Гц до 10 кГц при тех же габаритах и весе.

5. Магнитометры Львовского Института космических исследований.

Датчики семейства LEMI разработаны львовским институтом космических исследований и представлены на рынке довольно широким спектром специализированных преобразователей. Магнитометр LEMI-120 [13] характеризуется исключительно низким уровнем шумов и широким динамическим частотным диапазоном, что делает его пригодным для различных применений в геофизике. Встроенный в датчик предварительный МДМ-усилитель с малым потреблением энергии и дифференциальным выходом позволяет использовать датчик, отнесенный от регистратора на расстояние до 200 метров от места установки магнитометра.

Датчик LEMI-120 имеет длину 134 см при диаметре 8,5 см и массе 6 кг. Он характеризуется достаточно высокой чувствительностью и работает в частотном диапазоне 0.0001 - 1000 Гц.

Индукционный магнитометр LEMI-118 [14] представляет собой среднечастотный датчик для полосы частот 1 - 70000 Гц. Его длина 80 см и вес 1,7 кг. Магнитометр для космических исследований LEMI-106 [15] имеет частотный диапазон 0.5 - 50000 Гц. Методика расчета по критерию минимальной массы позволила значительно уменьшить массу этого индукционного преобразователя до 320 г при длине 40 см. Глубокая обратная связь по магнитному потоку позволила реализовать плоскую АЧХ с низким уровнем шумов в широком диапазоне частот.

6. Российские разработки магнитометров.

На Российском рынке до последнего времени практически отсутствовало предложение отечественных индукционных магнитометров высокого класса. Можно упомянуть лишь несколько образцов.

Датчик НВ0195_7 [16] разработки ООО НПО ЭНТ (Санкт – Петербург) имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику с частотой среза 0,5 Гц и достаточно низкий уровень собственного шума, что позволяет использовать его для геологоразведочных работ методом аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ). Датчик размещен в прочном водонепроницаемом стеклотекстолитовом корпусе трубчатой формы длиной 1110 мм, диаметром 70 мм и имеет вес 4,8 кг. Он является базовой моделью серии, объединенной общими конструктивными решениями и предназначен для работы в диапазоне частот от 0,001 Гц до 20 кГц.

Датчики разработки СНИИМ (Новосибирск) [17] с отрицательной обратной связью по магнитному полю, аналоговым и цифровым выходом для использования со стандартной аппаратурой МТЗ и АМТЗ. Магнитометры так же могут использоваться для мониторинга за состоянием магнитного поля Земли (МПЗ), биофизических и экологических исследований. Набор различных датчиков обеспечивает измерение характеристик магнитной индукции в частотном диапазоне 0,001 Гц - 20 кГц.

На базе разработанных в СНИИМ магнитометров была создана автоматическая станция магнитной подсистемы мониторинга за соблюдением договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. В основе программно-математического обеспечения лежит алгоритм, осуществляющий автоматическое обнаружение геомагнитных возмущений в диапазоне короткопериодных колебаний (0,01 – 20 Гц), возникающих при ядерных испытаниях в околоземном пространстве.

В работе [2] описана высокочувствительная измерительная станция КВВН-7, использующая магнитные датчики отечественной разработки и позволяющая одинаково эффективно выполнять частотные зондирования с контролируемыми источниками и аудио магнитотеллурические зондирования в поле естественных вариаций в широком спектре частот (0.1–2000 Гц). Применение станции КВВН-7 позволяет с высоким разрешением исследовать электропроводность и флюидный режим верхней части земной коры для решения, как геологических задач, так и задач электромагнитного мониторинга сейсмоопасных территорий в комплексе с сейсмическими методами.

В последние годы в результате кооперации НИРФИ (Нижний Новгород) и ООО «ВЕГА» (Санкт Петербург) были разработаны современные индукционные датчики для геофизических применений в широком диапазоне частот IMS-007, IMS-008 и IMS-009, а также бортовые низкочастотный и высокочастотный датчики магнитного поля для мониторинга электромагнитной обстановки в ближнем космосе.

В таблицу 2 сведены основные метрологические характеристики упомянутых датчиков (частотный диапазон и шумы), прочерки означают, что датчик находится вне диапазона, либо то, что разработчик не приводит сведений по шумам.

На самых низких частотах лучшими характеристиками обладает датчик МТС-50 фирмы «Феникс», однако уже на частотах порядка 10^{-2} – 10^{-1} Гц датчик теряет свои преимущества перед остальными. По нашему мнению, наиболее универсальным и сбалансированным по предельной чувствительности и частотному диапазону является датчик MFS-06, разработки фирмы «Метроникс». Однако для выполнения конкретных научных или прикладных задач потребитель может выбрать и другой датчик из представленного списка, руководствуясь его ценой, габаритами, удобством эксплуатации или совместимостью с имеющимися средствами регистрации, накопления и обработки данных.

Таблица 2

	Частотный диапазон	Шумы датчика на частоте 0,01 Гц $\text{нТл/Гц}^{1/2}$	Шумы датчика на частоте 1 Гц $\text{нТл/Гц}^{1/2}$	Шумы датчика на частоте 1000 Гц $\text{нТл/Гц}^{1/2}$
MFS-06	0.0002Hz – 10 kHz	10^{-2}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-7}$
MFS-07	0,001Гц 50 кГц	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
МТС -50	0,0002Гц – 400 Гц	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-4}$	- . -
АМТС -30	1 Гц 10 кГц	- . -	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$
ANT/4	0,0001Гц-1кГц	10^{-2}	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-5}$
ANT/6	0,1 Гц – 10 кГц	- . -	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-6}
BF-4	0,001Гц 700 Гц	10^{-2}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-5}$
BF-10	0,1 Гц – 10 кГц	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$
LEMI-102	0,001Гц 200 Гц	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-5}$	- . -
LEMI-102	8 Гц 8 кГц	- . -	- . -	$2 \cdot 10^{-6}$
HB0195_7	0,1 Гц 20 кГц	- . -	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
СНИИМ	0,001Гц 20 кГц	- . -	- . -	- . -
IMS - 007	0,001Гц 10 кГц	- . -	- . -	- . -
IMS - 008	0.0001 Hz – 1Гц	10^{-2}	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-7}$
IMS - 009	0,001Гц 10 кГц	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$

Список литературы

1. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сергушин П.А., Копытенко Е.А., Бируля М.А., Скороходов А.А., Есипко О.А., Дамаскин Р.В. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников. // Физика Земли. 2013. № 6. С. 99-115.
2. 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.44-58.
3. Kopytenko E.A., Palshin N.A., Poljakov S.V., Schennikov A.V., Reznikov B.I., Samsonov B.V. 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.
4. Нечаев, С.А. Руководство по стационарным геомагнитным наблюдениям. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2006. 140 с.
5. Поляков С.В., Резников Б.И., Шлюгаев Ю.В., Копытенко Е.А. Первый опыт пространственной дискриминации крупномасштабных естественных КНЧ помех на примере двухпунктовых измерений магнитного поля от искусственного ионосферного источника. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 12. С. 1030 - 1042.
6. <http://www.metronix.de/metronix/index.php>
7. http://178.63.62.205/mtxgeo/images/brochures/FlyerMFS-06e_rus_v33.pdf
8. http://178.63.62.205/mtxgeo/images/brochures/FlyerMFS-07e_en_v33.pdf
9. <http://www.phoenix-geophysics.com/home/>
10. <http://www.phoenix-geophysics.com/products/sensors/>
11. <http://www.zonge.com/>
12. http://www.slb.com/about/rd/technology/emi/bf_sensor.aspx
13. <http://www.isr.lviv.ua/lemi120ru.htm>
14. <http://www.lemisensors.com/?q=LEMI-118>
15. <http://www.isr.lviv.ua/lemi106ru.htm>
16. <http://www.nvlaboratory.spb.ru/0195.html>
17. <http://sniim.nsk.ru/old/departs/07/>
18. <http://www.dewhurstgroup.us/ru/index.php/resources>

Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 в составе комплекса «Энергия-Зонд» для электромагнитных исследований с использованием антенной системы СпецЛЭП «ЗЕВС»

В.В. Колобов¹, Д.В. Куклин¹, М.Б. Баранник¹, А.Н. Шевцов²

¹Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, e-mail: 1_i@mail.ru

²Геологический институт КНЦ РАН, abd.zham@mail.ru

Для электромагнитных зондирований с применением СНЧ-антенны СпецЛЭП «Зевс» разработан генераторно-измерительный комплекс «Энергия-Зонд». В качестве источников поля комплекса используются генераторы «Энергия-2» и «Энергия-3», а в качестве приемной части – многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7. Станция разрабатывалась для решения проблемы глубинного зондирования земной коры на больших удалениях между источником и приемником, достигающих иногда многих сотен (до тысячи) километров [1].

Станция КВВН-7 позволяет выполнять измерения напряженности электрического и магнитного поля естественных и контролируемых источников в широком частотном диапазоне 0.1–2000 Гц. Регистрация сигналов осуществляется по семи каналам (три магнитных и четыре электрических). Запись сигналов в станции КВВН-7 осуществляется в «открытом» канале с подавлением помех только на краях заданного частотного диапазона и на нечетных гармониках промышленной частоты (до 9-й гармоники). Это позволяет одновременно производить регистрацию сигналов естественных и контролируемых источников.

Станция КВВН-7 включает в себя систему электрических и магнитных датчиков, измерительный блок, внешний 14-ти разрядный аналого-цифровой преобразователь и полевой портативный компьютер (рис.1).

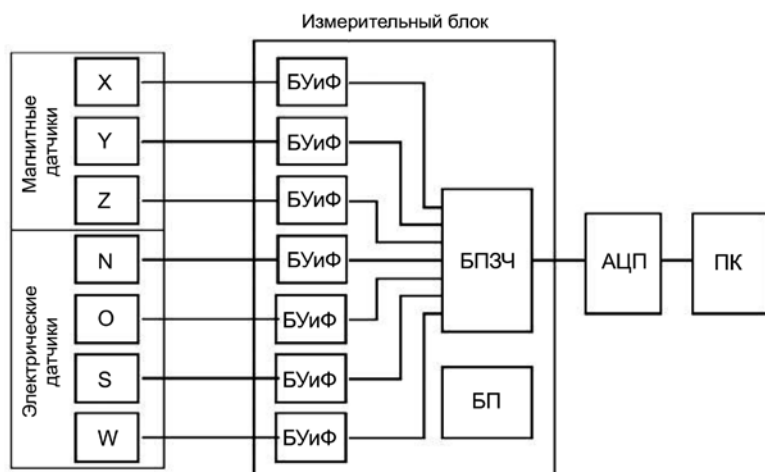


Рис. 1. Структурная схема станции КВВН-7, где
БУиФ – блок усиления и фильтрации,
БПЗЧ – блок подавления зеркальных частот, БП – блок питания, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер

В состав измерительного блока станции входят:

- семь каналов усиления и фильтрации (БУиФ) для сигналов, поступающих с электрических и магнитных датчиков (3 магнитных канала и 4 электрических);
- блок подавления зеркальных частот (БПЗЧ);
- блок питания (БП) в состав которого входят автономный гальванический источник напряжения (свинцово-гелевый аккумулятор напряжением 12 В) и импульсный преобразователь питания, который формирует из напряжения аккумулятора двуполярное напряжение ± 15 В питания микросхем усилителей и фильтров измерительных каналов.

Как уже отмечалось, частотный диапазон исследования электрического и магнитного поля составляет 0.01-2000 Гц. При этом сигнал в большей его части состоит из промышленных помех. В частности, это первая и высшие гармоники промышленной частоты 50 Гц. Источниками этих частот являются линии электропередач, электрифицированные заземленные установки и прочие источники. Следует отметить, что из высших гармоник наибольший вклад вносят только нечетные гармоники. Исследования показали, что в условиях удаленности от линий электропередач и электрифицированных железных дорог на расстояние более 10 км амплитуды гармоник промышленной частоты, лежащих в диапазоне выше 450 Гц, сравнимы с невозмущенным полем. В то же время величина гармоник частотой 50, 150, 250, 350 и 450 Гц (1, 3, 5, 7 и 9-я гармоника промышленной частоты), как правило, оказываются выше амплитуды полезного сигнала. Также отмечены значительные изменения амплитуды промышленных помех в разное время суток, тогда как частоты гармоник практически не меняются. Таким образом, применение заградительных фильтров с узким диапазоном заграждения не даст

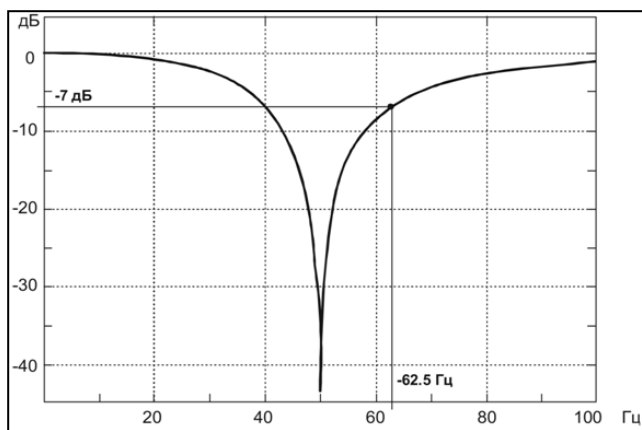


Рис. 2. АЧХ заградительного фильтра на частоту 50 Гц

необходимого результата. А с учетом того факта, что гармоники наиболее близкие к основной имеют наибольшую амплитуду, то добротность фильтров, настроенных на загораживание 1-й, 3-й, 5-й, 7-й и 9-й гармоник, должна быть соответственно Q , $3Q$, $5Q$, $7Q$ и $9Q$. Здесь Q - добротность заградительного фильтра на частоте 50 Гц, выбираемая таким образом, чтобы затухание полезного сигнала на частотах 40 Гц и 62.5 Гц было на уровне не более 7 дБ (рис. 2).

Подробно структурные схемы блоков усиления и фильтрации сигналов, поступающих с электрических и магнитных датчиков, рассмотрены в [1, 2]. Здесь лишь приведем амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) каскада фильтров измерительных каналов (рис. 3).

Блок подавления зеркальных частот является фильтром нижних частот и служит для ограничения АЧХ сквозного измерительного канала сверху. При реализации такого ФНЧ можно было бы ограничиться верхним пределом полосы частот по Найквисту, но на практике, при оцифровке аналогового сигнала с широким спектром, необходимо избежать зеркального отражения спектра для частот, лежащих выше частоты Найквиста. Практическая реализация такого фильтра весьма сложна, так как амплитудно-частотные характеристики фильтров имеют не прямоугольную, а колоколообразную форму и по этой причине образуется некоторая полоса «затухания». Поэтому максимальную частоту спектра дискретизируемого сигнала принимают несколько ниже частоты Найквиста, чтобы обеспечить надежное подавление фильтром «зеркальных» гармоник.

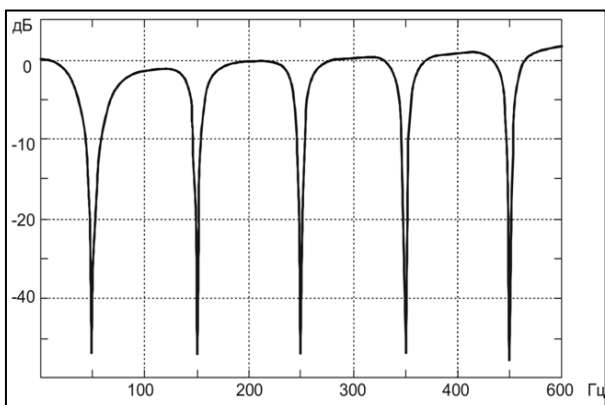


Рис. 3. АЧХ заградительного каскада фильтров измерительных каналов

составляет 40 Гц при частоте дискретизации 100 Гц и 2 кГц при частоте дискретизации 5 кГц. АЧХ фильтра с частотой среза 2 кГц приведена на рис. 4.

Суммарная (сквозная) амплитудно-частотная характеристика измерительного канала станции приведена на рис. 5. Необходимо отметить, что при реализации аналоговых фильтров в блоке усиления и фильтрации и в блоке подавления зеркальных частот использованы новейшие пассивные компоненты – резисторы с низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС менее $25 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и конденсаторы с низким температурным коэффициентом емкости (ТКЕ $\pm 30 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Использование таких компонентов позволяет эксплуатировать станцию в широком диапазоне температур без ухудшения избирательных характеристик измерительных каналов.



Рис. 4. АЧХ блока подавления зеркальных частот при частоте дискретизации 5 кГц.

Для предотвращения попадания высоких пиковых напряжений (чаще всего от молниевых разрядов) в низковольтные цепи станции все чувствительные схемы измерительного блока защищены от перенапряжений варисторами.

Датчики магнитного поля представляют собой индукционные катушки. В корпус каждого датчика встроены регулируемый предусилитель, активные заградительные фильтры четвертого порядка на частоту 50 и 150 Гц, а также цепь индикации перегрузки. На

индукционные катушки. В корпус каждого датчика встроены регулируемый предусилитель, активные заградительные фильтры четвертого порядка на частоту 50 и 150 Гц, а также цепь индикации перегрузки. На

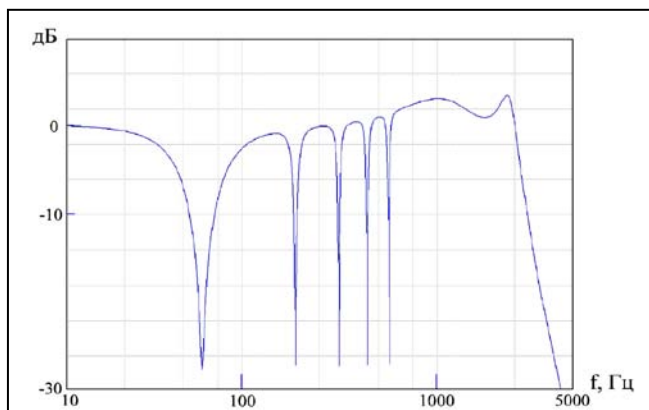


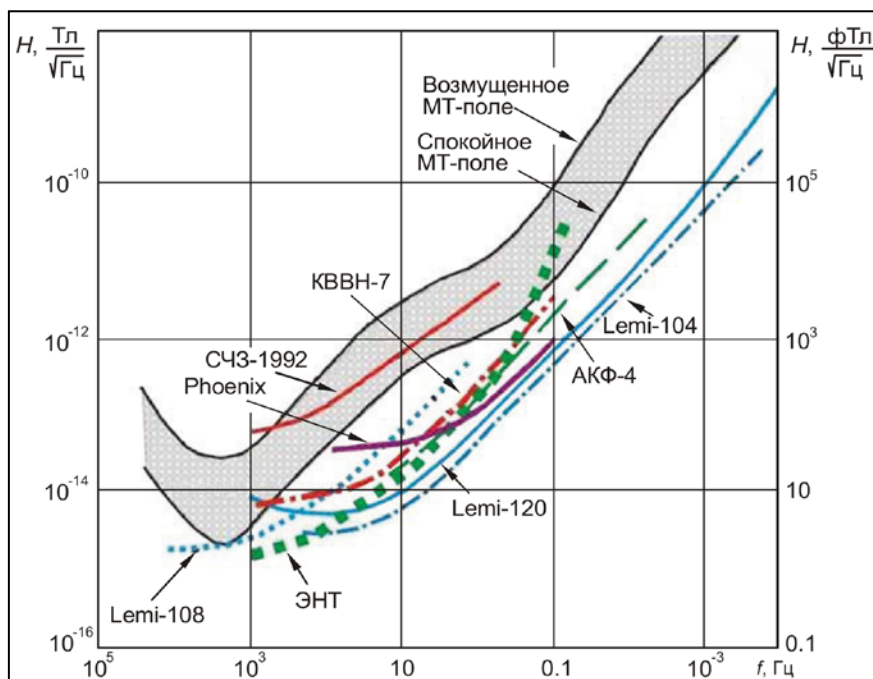
Рис. 5. Сквозная амплитудно-частотная характеристика канала измерительного блока станции КВВН-7.

рис. 6 представлена сводная диаграмма спектральных характеристик собственных шумов магнитных датчиков станции КВВН-7 и некоторых современных МТ станций. Оценка собственных шумов станции КВВН-7 получена путем измерения и сложения ЭДС датчиков, установленных параллельно и навстречу друг другу. Можно видеть, что практически во всем частотном диапазоне собственные шумы станции КВВН-7 находятся ниже минимального уровня шумов естественного МТ поля (заштрихованная полоса). Это позволяет использовать станцию одинаково эффективно как для измерения сигналов контролируемых источников, так и для измерения естественного электромагнитного поля с целью аудиоманнитотеллурического (АМТ) зондирования в диапазоне частот 0.1-2000 Гц.

С измерительного блока сигнал поступает на 14-разрядный АЦП E14-440 фирмы L-card [3], в котором происходит преобразование аналогового сигнала в цифровой вид с частотой дискретизации от 5 до 50 кГц при записи сигнала с выхода фильтра 2.5 кГц и с частотой от 100 до 500 Гц при подключении АЦП к выходу фильтра 40 Гц. Низкочастотный диапазон предусмотрен для проведения долговременных записей (сутки и более), а высокочастотный – для кратковременных записей (от 20–30 мин до 3–4 ч).

Обработка данных производится в полевых условиях с помощью портативного компьютера и пакета программ PowerGraph 3.3.8 [4]. Обработка включает процедуры фильтрации, вычисление спектральных характеристик методом БПФ со скользящим окном с заданной функцией окна, децимация сигнала, простейший статистический анализ и детектирование сигнала. Имеется возможность конвертации бинарных форматов файлов в текстовый формат.

Рис. 6. Собственные шумы датчиков магнитного поля станции КВВН-7 в сопоставлении с некоторыми известными отечественными и зарубежными аналогами.



Пример спектрограммы записи естественного поля на полевой точке «Светлый» (Кольский полуостров) станцией КВВН-7 приведен на рис. 7. Можно видеть, что на всех семи каналах отчетливо (вплоть до четвертой гармоники) прослеживаются шумановские резонансы, кратные частоте 7.5 Гц, а также сигналы от антенны сверхнизкочастотного излучения генератора «Зевс».

Внешний вид всех блоков станции КВВН-7 приведен на рис. 8. Станция является портативной, переносной. Аккумулятор питания напряжением 12 В и емкостью 17 А·ч размещен внутри измерительного блока. Ток потребления станции составляет 0.17 А. Масса измерительного блока не превышает 10 кг.

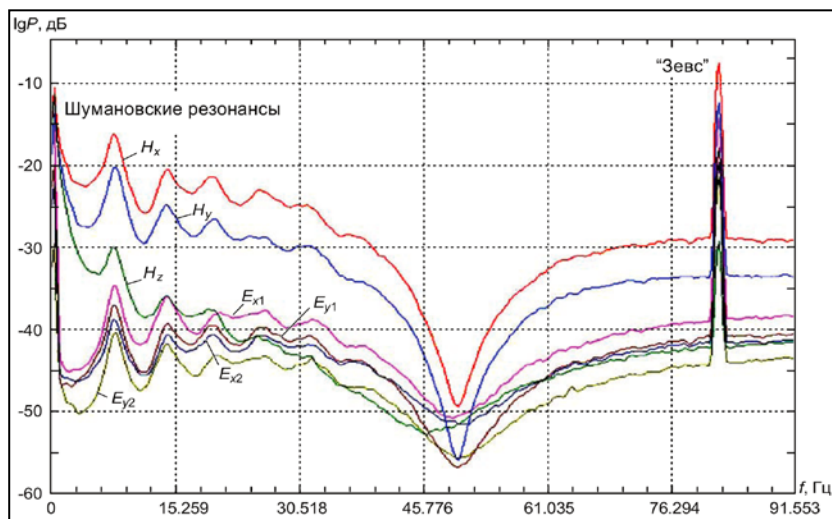


Рис. 7. Запись АМТ поля, полученная с помощью станции КВВН-7, в пункте Светлый Кольского полуострова 17.08.2009 г.

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. Станция успешно использовалась в ходе экспериментов «FENICS-2009» [5] и «НУР» [6]. Станции КВВН-7 и VMTU-10 составляют измерительную часть генераторно-измерительного комплекса «Энергия-Зонд» для электромагнитных исследований с использованием антенной системы СпецЛЭП «Зевс».

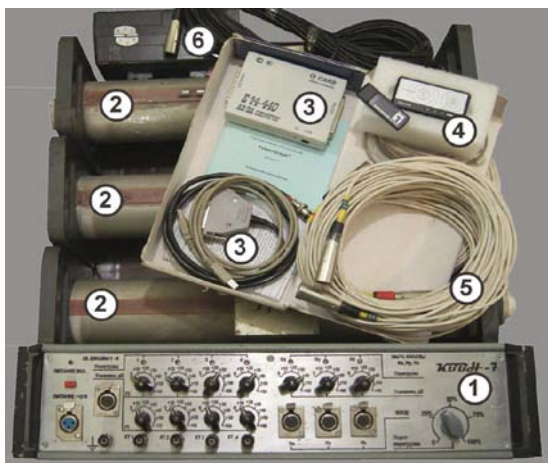


Рис. 8. Внешний вид семиканальной цифровой измерительной станции КВВН-7, где:

- 1 – измерительный блок;
- 2 – индукционные датчики;
- 3 – АЦП E14-440 и кабели к нему;
- 4 – GPS-приемник BT-359;
- 5 – фидера магнитных индукционных

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. С. 240 с.
2. 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.
3. E14-440 Внешний модуль АЦП/ЦАП на шину USB [Электронный ресурс] // URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e440> (дата обращения 20.01.2013)
4. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph // ПиКАД – Промышленные измерения, Контроль, Автоматизация, Диагностика. 2007. № 3. С. 42-47
5. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Короткова Т.Г. и др. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент FENICS) // Физика Земли. 2011. № 1. С. 4–26.
6. Жамалетдинов А.А., Петрищев М.С., Шевцов А.Н. и др. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников // Физика Земли. 2013. № 6. С. 99.

При этом во всем частотном диапазоне 0.001-500 Гц ток в антенне ограничивается только сопротивлением излучающего контура.

Для генератора «Энергия-2» была разработана схема согласующего устройства, состоящего из достаточно ограниченного набора типоминалов конденсаторов, но обеспечивающего высокую эффективность компенсации реактивной составляющей излучающей антенны в виде промышленной ЛЭП с индуктивностью 0.16-0.18 Гн в широком диапазоне частот [3]. При оценке эффективности такого СУ для компенсации индуктивности линий СпецЛЭП в различной конфигурации подключения необходимо учитывать, что величина их индуктивности значительно ниже: индуктивность первой линии – 0.1 Гн, второй линии – 0.115 Гн, индуктивность параллельно соединенных линий – 0.073 Гн. Проведенные расчеты показали, что СУ генератора «Энергия-2» позволяет компенсировать индуктивность линий СпецЛЭП в диапазоне частот до 100 Гц. Для работы на более высоких частотах необходимо использовать дополнительные конденсаторы малой емкости.

Для электромагнитных зондирований с использованием в качестве антенны СпецЛЭП объекта «Зевс» был также разработан КНЧ-генератор с автономным питанием, получивший обозначение «Энергия-3». Генератор разрабатывался на базе двухканального КНЧ-генератора «Энергия-2М» мощностью до 29 кВт, предназначенного для подачи сигналов одинаковой частоты, но разной амплитуды и фазы, в две ортогональные заземленные антенны с целью получения управляемой диаграммы направленности. Принцип действия и конструктивное исполнение генератора «Энергия-2М» подробно изложены в [4]. При разработке генератора «Энергия-3» учитывалось, что нагрузкой генератора будет одна из линий СпецЛЭП или параллельно соединенные линии СпецЛЭП. Функциональная схема генератора «Энергия-3» приведена на рис. 2.

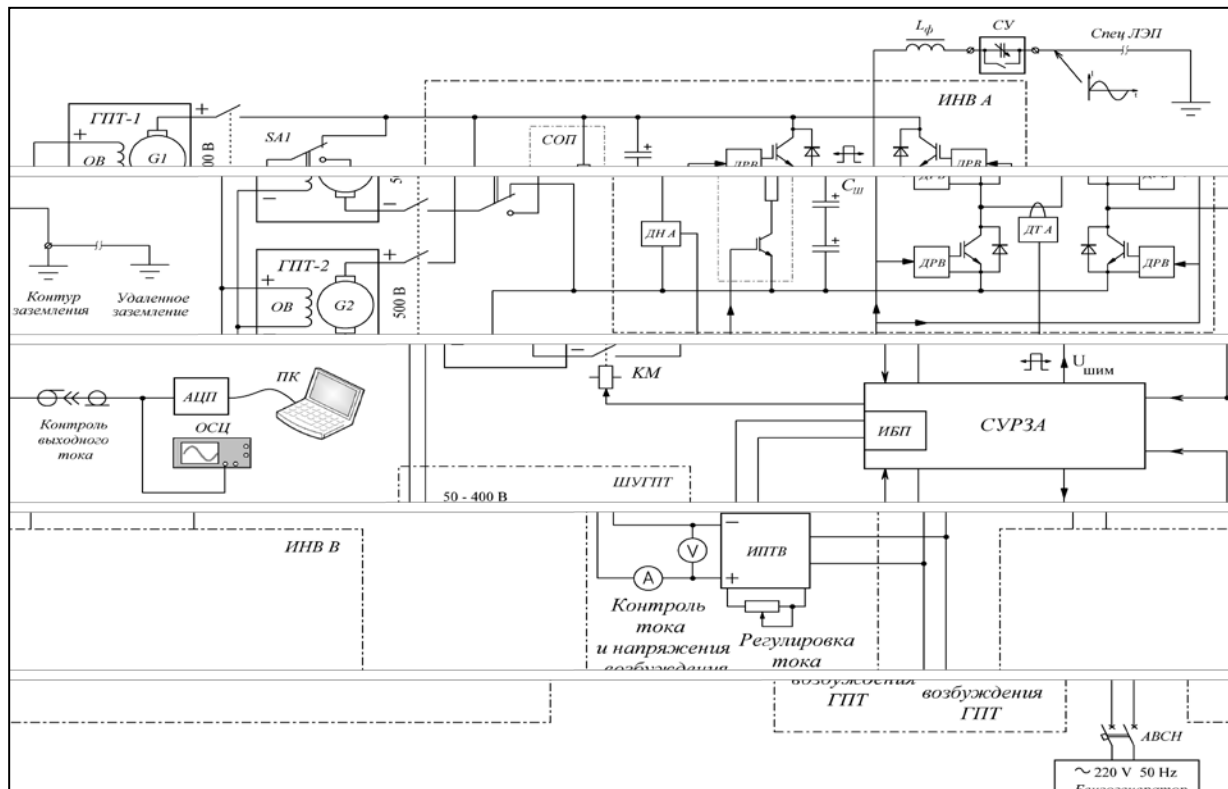


Рис. 2. Функциональная схема генератора «Энергия-3»

АВСН – автоматический выключатель собственных нужд; ГПТ-1, ГПТ-2 – генераторы постоянного тока; ШУГПТ – шкаф управления генераторами постоянного тока; ИПТВ – источник постоянного тока возбуждения ГПТ; ОВ – обмотка возбуждения; КМ – контактор магнитный; ИНВ – инвертор; СОП – схема ограничения перенапряжений; Сш – конденсаторы звена постоянного тока инвертора; ДРВ – драйверы управления IGBT модулями; ДН А – датчик напряжения канала А; ДТ А – датчик тока канала А; Лф – дроссель выходного фильтра НЧ; СУ – согласующее устройство; СУРЗА – схема управления, регулирования, защиты и автоматики; ИБП – многоканальный импульсный блок питания; АЦП – внешний аналогово-цифровой преобразователь; ОСЦ – осциллограф; ПК – портативный компьютер.

Высоковольтный инвертор (ИНВ) состоит из двух идентичных инверторов канала А и канала В, имеющих общую схему управления. В состав каждого инвертора входят два силовых полумостовых IGBT модуля, схемы драйверов управления IGBT модулями (ДРВ), конденсаторы звена постоянного тока (С_{ИНВ}А,

$C_{инвB}$), дроссель выходного фильтра НЧ (Lф), а также датчики выходного тока (ДТ А, ДТ В) и напряжения шины звена постоянного тока (ДН А, ДН В). Подача напряжения с выходов генераторов постоянного тока (ГПТ) на входы инвертора осуществляется магнитным контактором КМ. Схема ограничения перенапряжений (СОП) задействована для быстрого разряда конденсаторов ($C_{ш}$) звена постоянного тока инвертора канала А.

Так как выходная мощность генератора «Энергия-3» ограничена суммарной мощностью питающих генераторов постоянного тока П-72 и составляет 29 кВт, в инверторе используется только один канал – А. Силовая часть канала В не задействована. В генераторе используется система управления регулирования защиты и автоматики (СУРЗА) от генератора «Энергия-2М» с измененной программой управления центрального микроконтроллера.

Как уже отмечалось, в качестве силового источника питания используются два автономных генератора постоянного тока (ГПТ-1, ГПТ-2) типа П-72 электроразведочной станции ЭРС-67 выходной мощностью до 14.5 кВт и напряжением до 500 В каждый. Была разработана схема коммутации выходов ГПТ на основе ключа SA1, позволяющая реализовать одну из схем соединения ГПТ для питания звена постоянного тока высоковольтного инвертора. При верхнем положении SA1 на рис.2, генераторы ГПТ-1 и ГПТ-2 соединены параллельно и обеспечивают выходное напряжение до 500 В и ток до 60 А. При нижнем положении SA1 генераторы включаются последовательно и формируют на звене постоянного тока инвертора напряжение до 1000 В, обеспечивая силу тока до 30 А. Выбор схемы подключения ГПТ определяется частотой генерации.

На рис. 3. приведены результаты расчета частотной зависимости активной составляющей $R(\omega) = \text{Re}[Z(\omega)]$ полного сопротивления $Z(\omega)$ первой и второй линии, а также двух параллельно соединенных линий СпецЛЭП. Полное сопротивление линии в общем виде может быть найдено:

$$Z(\omega) = l_{\text{лин}} \cdot (Z_{\text{возвр}}(\omega) + Z_{\text{лин}}(\omega) + Z_{\text{пров}}(\omega)) + Z_{3У},$$

где $l_{\text{лин}}$ – длина излучающей линии; $Z_{\text{возвр}}(\omega)$ – погонное сопротивление возвратному току в земле; $Z_{\text{лин}}(\omega)$ – погонное реактивное сопротивление линии с учетом высоты подвеса провода; $Z_{\text{пров}}(\omega)$ – реактивное сопротивление проводов линии; $Z_{3У}$ – суммарное сопротивление заземляющих устройств. Подробно методика расчета полного сопротивления нулевой последовательности ЛЭП приведена в [3].

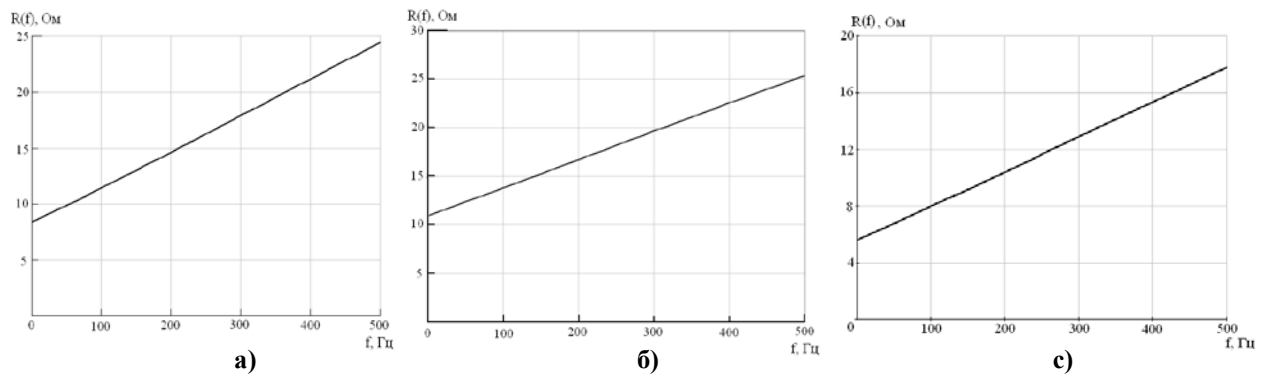


Рис. 3. Зависимость активной составляющей полного сопротивления первой (а), второй (б) и двух параллельно соединенных линий (с) СпецЛЭП от частоты

Оценим мощность потребляемую генератором «Энергия-3» от ГПТ для каждого из трех возможных вариантов подключения линий СпецЛЭП. При работе на вторую линию, имеющую сопротивление на постоянном токе 11 Ом, потребляемая от ГПТ мощность на нижней частоте составит величину 22.9 кВт, что меньше суммарной мощности питающих генераторов, и при увеличении частоты будет уменьшаться. Следовательно, на вторую линию во всем частотном диапазоне можно работать без ограничения выходного напряжения ГПТ. Первая линия имеет сопротивление на постоянном токе 8.5 Ом, мощность, потребляемая от ГПТ, на нижней частоте составит 29.8 кВт, что близко к допустимой суммарной мощности ГПТ. В целом можно заключить, что работа на первую линию во всем частотном диапазоне также может проходить без ограничения выходного напряжения ГПТ. При параллельном соединении линий из-за уменьшения $R(f)$ необходимо ограничивать выходное напряжение параллельно включенных генераторов постоянного тока в диапазоне частот от 0 до 130 Гц таким образом, чтобы отбираемая от них мощность не превышала 29 кВт.

Рассмотрим необходимую для максимальной отдачи энергии в нагрузку во всем частотном диапазоне конфигурацию соединения ГПТ. Расчетные графики зависимости тока (амплитудное значение) в нагрузке от частоты при работе на линию 1 (а) и линию 2 (б) и на две линии, соединенные в параллель (с), приведены на рис. 4. Необходимо отметить, что все приведенные ниже значения и зависимости для частот выше 14 Гц,

рассчитаны с использованием СУ и соответствуют режиму резонанса, когда потребляемая от ГПТ мощность является чисто активной.

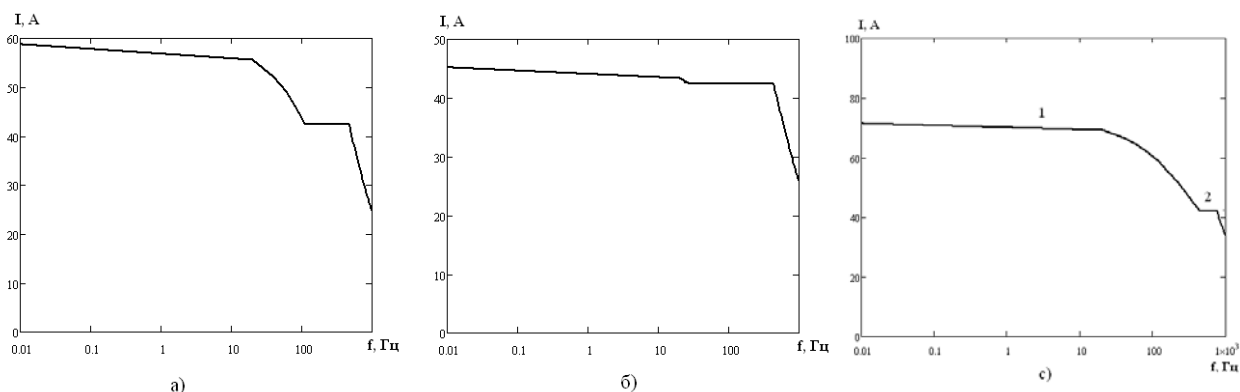


Рис. 4. Расчетные зависимости амплитудного значения тока в нагрузке от частоты при работе генератора «Энергия-3» на линию 1 (а), линию 2 (б) и параллельно соединенные линии 1 и 2 (с) СпецЛЭП.

При работе на первую линию на частоте 94.22 Гц ток потребляемый от параллельно соединенных ГПТ составляет 31.4 А, а на частоте 194.2 Гц падает до 24 А, следовательно на частоте 194.2 Гц и выше необходимо переходить на режим с последовательным соединением ГПТ и ограничением их выходной мощности по току до 30 А регулировкой оборотов приводящего двигателя.

При работе на вторую линию ток потребляемый от ГПТ уже на частоте 38.22 Гц составит величину 29.4 А, соответственно, переходить на последовательное соединение ГПТ при работе на вторую линию необходимо на частотах от 38.22 Гц и выше.

При работе генератора на нагрузку в виде параллельно соединенных линий СпецЛЭП на частотах до 400 Гц питание инвертора осуществляется от параллельно соединенных ГПТ (участок 1 на рис. 4с). Причем до частоты 130 Гц работа осуществляется с ограничением выходного напряжения ГПТ регулировкой оборотов приводящего двигателя таким образом, чтобы потребляемая от генераторов мощность не превышала 29 кВт, а после – на максимальном выходном напряжении. На частотах выше 400 Гц ГПТ включаются последовательно (участок 2 на рис. 4с). На рис. 5 представлено размещение основных блоков генератора «Энергия-3» в кунге автомашины.

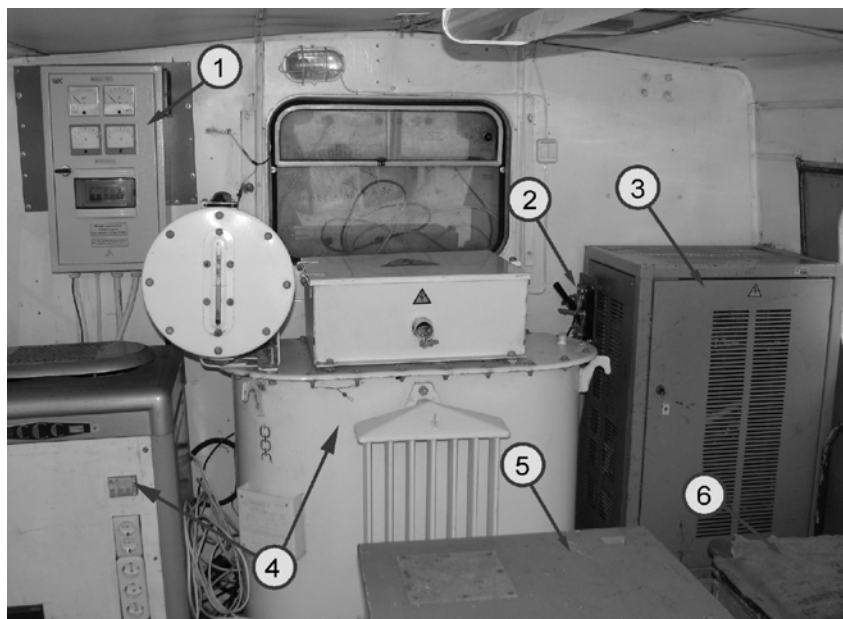


Рис. 5. Внешний вид блоков генератора «Энергия-3»:

- 1 – шкаф управления генераторами постоянного тока (ШУГПТ);
- 2 – переключатель параллельное/последовательное соединение ГПТ;
- 3 – шкаф инвертора;
- 4 – неиспользуемые блоки генератора «Энергия-2М»;
- 5, 6 – стол и сиденье персонала.

После проведения расчетно-теоретических работ был выполнен проект электрической схемы согласующего устройства генератора «Энергия-3», состоящего из ограниченного набора типоминималов конденсаторов, но обеспечивающего высокую эффективность компенсации реактивной составляющей излучающей антенны в диапазоне частот генерации до 533 Гц. Схема СУ генератора «Энергия-3» приведена на рис. 6. В состав СУ входит 24 высоковольтных конденсатора (C1-C24) с различными номиналами емкости и 14 перемычек (X1-X14) с помощью которых конденсаторы коммутируются таким образом, чтобы обеспечить

необходимую емкость СУ для компенсации индуктивности линии СпецЛЭП во всем диапазоне дискретных частот генерации. Одновременное соединение перемычек X2 и X3 замыкает СУ, при этом антенна подключается через фильтрующий дроссель непосредственно к выходу инвертора генератора. Такое подключение применяется на частотах ниже 19.42 Гц, когда синусоидальность формы тока в антенне обеспечивается широтно-импульсной модуляцией.

При выборе типов конденсаторов и их допустимого рабочего напряжения учитывалось, что при обеспечении полной компенсации индуктивности линий СпецЛЭП напряжение на СУ при работе на максимальной рабочей частоте может достигать нескольких киловольт [3].

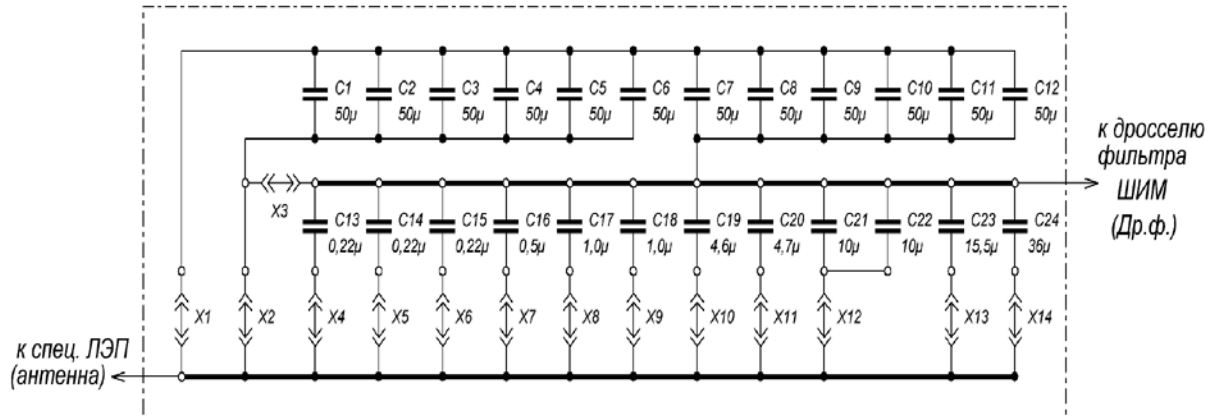


Рис. 6. Принципиальная схема согласующего устройства генератора «Энергия-3». ЛЭП – линия электропередачи; X1-X14 – разъемные перемычки; C1-C24 – конденсаторы СУ; Др.ф. – дроссель фильтра ШИМ.

Проектный режим работы генератора «Энергия-3» на антенну СпецЛЭП приведен в таблице 1. В таблице 2 приведены расчетные емкости СУ и реальные емкости, формируемые коммутацией конденсаторов, входящих в СУ, для различных частот и разных вариантов конфигурации излучающей антенны. Как видно из таблицы СУ генератора «Энергия-3» позволяет компенсировать индуктивность линий СпецЛЭП в любой конфигурации подключения во всем диапазоне частот.

Таблица 1

Проектный режим работы генератора «Энергия-3» на антенну СпецЛЭП

№ частоты	Частота, Гц	Длительность, мин.	Форма сигнала	Компенсация
1	0.192	20	меандр	нет
2	0.942	10	меандр	нет
3	1.942	5	меандр	нет
4	3.822	5	усеченный синус	нет
5	6.422	4	синус	да
6	9.422	3	синус	да
7	13.82	3	синус	да
8	19.42	3	синус	да
9	38.22	3	синус	да
10	64.22	3	синус	да
11	94.22	3	синус	да
12	194.2	3	синус	да
13	332.2	3	синус	да
14	533.2	3	синус	да

Таблица 2

Расчетная и реальная емкость СУ генератора «Энергия-3» на различных частотах при использовании разных вариантов подключения линий СпецЛЭП

Антенна	Первая линия		Вторая линия		Параллельно соединенные линии	
	Расчетн. $C_{СУ}$, мкФ	Реальн. $C_{СУ}$, мкФ	Расчетн. $C_{СУ}$, мкФ	Реальн. $C_{СУ}$, мкФ	Расчетн. $C_{СУ}$, мкФ	Реальн. $C_{СУ}$, мкФ
19.42	610.6	610	584	600	920.066	920
38.22	157.6	159	150	150	237.54	237
64.22	55.8	56	53.4	56	84.135	84
94.22	25.94	26	24.8	25	39.087	39
194.2	6.1	5.9	5.8	5.7	9.199	9.2
332.2	2.0	2	1.99	2	3.144	3.144
533.2	0.81	0.72	0.77	0.72	1.22	1,22
19.42	610.6	610	584	600	920.066	920
38.22	157.6	159	150	150	237.54	237
64.22	55.8	56	53.4	56	84.135	84

Оценивая возможность и эффективность применения генераторов «Энегия-2» и «Энергия-3» в составе генераторно-измерительного комплекса «Энергия-Зонд» для проведения электромагнитных зондирований с использованием в качестве антенны СпецЛЭП объекта «Зевс» можно отметить, что высокая (200 кВт) выходная мощность генератора «Энегия-2», питающегося от трехфазной сети напряжением 380В, позволяет работать на нагрузку в виде каждой из линий СпецЛЭП по отдельности и на две линии соединенные параллельно на максимальном выходном напряжении (1000 В). При этом во всем частотном диапазоне (0.001-500 Гц) ток в антенне ограничивается только сопротивлением излучающего контура. В то же время генератор «Энегия-2» требует наличия питающего трансформатора соответствующей мощности и прокладки силового кабеля, а диапазон конфигурируемой емкости ранее разработанного СУ генератора «Энергия-2» не перекрывает весь диапазон частот генерации.

Генератор «Энергия-3» обладает большей автономностью, чем генератор «Энергия-2», так как не требует прокладки питающего кабеля и может быть оперативно размещен в месте удобном для подключения к любой из линий СпецЛЭП. Согласующее устройство генератора позволяет скомпенсировать индуктивность линий СпецЛЭП при работе на каждую из линий в отдельности и на две линии, соединенные в параллель, в диапазоне частот 19.42 - 533 Гц. Использование на нижних и верхних частотах различной схемы соединения генераторов постоянного тока, питающих выходной инвертор генератора, позволяет работать на первую и вторую линии СпецЛЭП без ограничения выходного напряжения практически во всем частотном диапазоне, при этом ток в антенне ограничивается только параметрами линии. При работе генератора «Энергия-3» на две параллельно соединенные линии СпецЛЭП, ток в антенне ограничивается суммарной мощностью питающих генераторов постоянного тока.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (13-05-12044-офи-м) и от РАН (проект ОНЗ, № 6).

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.: «СОЛЮ», 2013. 240 с.
2. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Короткова Т.Г. и др. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент FENICS) // Физика Земли. 2011. № 1. С. 4-26.
3. Терещенко Е.Д., Баранник М.Б., Григорьев В.Ф., Ивонин В.В., Колобов В.В., Миличенко А.Н., Прокопчук П.И., Селиванов В.Н. Разработка согласующего устройства стационарного источника электромагнитного излучения экстремально низкочастотного диапазона // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. Т. 4. № 1. С. 68-77.
4. Баранник М.Б., В.В. Колобов, А.Н. Шевцов, А.А. Жамалетдинов Генераторно-измерительный комплекс направленного действия «Энергия-2М» для сейсмического мониторинга и зондирования рудных объектов // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 1. С. 1-22.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КНЧ-СНЧ ДИАПАЗОНА С ИОНОСФЕРОЙ И ЗЕМНОЙ КОРОЙ

Материалы I Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара

Научное некоммерческое издание выпущено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований, грант офи-м 13-05-12044



Отпечатано в ООО К & М

184209 г. Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 17 а
Тел. / факс (88 1555) 77329

Тираж 100 экз.

