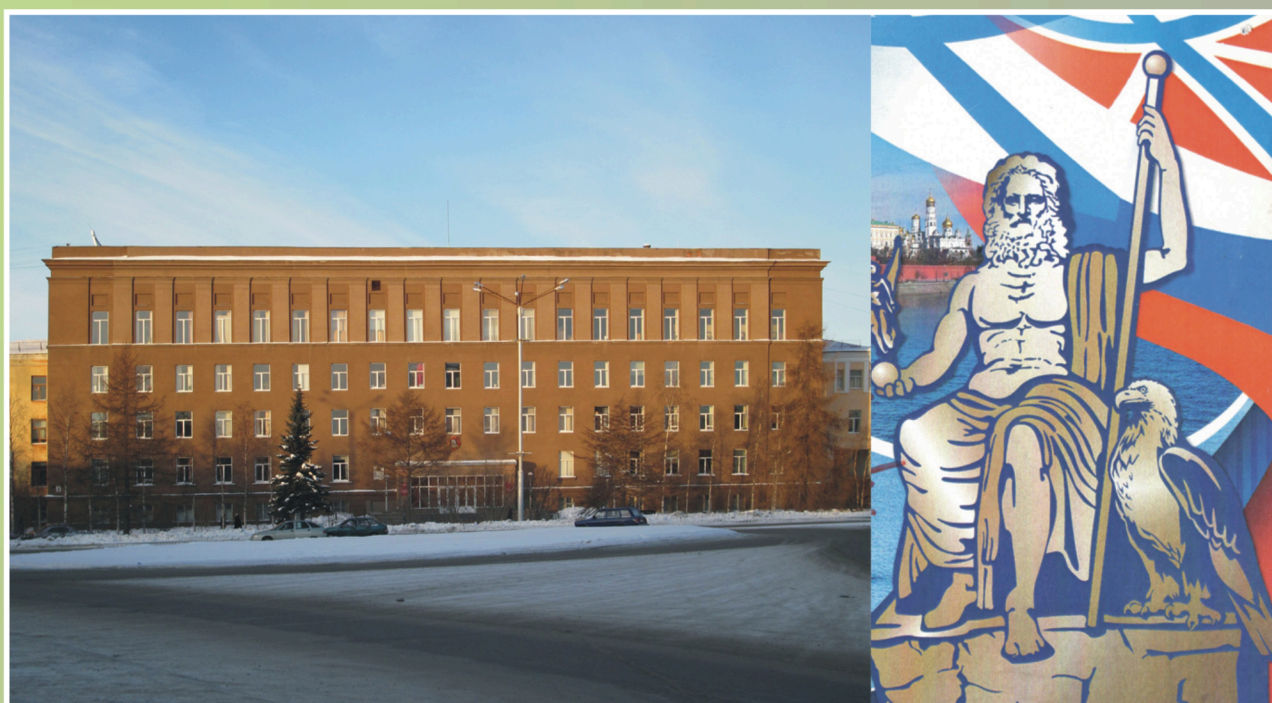




РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ СЧ ДИАПАЗОНА С ИОНОСФЕРОЙ И ЗЕМНОЙ КОРОЙ



Материалы Всероссийского (с международным участием)  
научно-практического семинара

Апатиты - 2014



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

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ СЧ ДИАПАЗОНА С ИОНОСФЕРОЙ И ЗЕМНОЙ КОРОЙ

---

Сборник репринтов научно-исследовательских и научно-популярных статей и сообщений,  
посвященных работам с СЧ радиостановкой «Зевс» по двухцелевому назначению в  
рамках конверсионной политики России

---

Том 1

Материалы Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара

Апатиты  
2014

УДК 550.837 (834)  
УДК 623:94 (47)

**Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой:** Материалы Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара. В 2 т. / Рос. акад. наук, Отд. наук о Земле, Кольский научный центр, Геологический институт; гл. ред. академик РАН Е.П. Велихов, зам. гл. редактора д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский. – Апатиты, 2014. – Т. 1. – 206 с.

ISBN 978-5-902643-23-4 (Том 1)

В книге представлены репринты опубликованных научных статей, тезисов докладов и сообщений в широкой печати, посвященных опыту научно-исследовательских и прикладных работ с антенной сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона «Зевс». Книга состоит из пяти глав и фотогалереи.

В первой главе представлены расчетно-теоретические работы. Во второй главе приводятся результаты экспериментальных исследований с СНЧ антенной «Зевс» в России и за рубежом. Третья глава посвящена актуальной и до конца не решенной проблеме мониторинга землетрясений и лунно-солнечных приливных явлений с использованием СНЧ поля источника «Зевс». Вопросы разработки методики и техники возбуждения и регистрации электромагнитного поля рассмотрены в четвертой главе. Особое место в книге занимает пятая глава. В ней собраны публицистические статьи, доклады и воспоминания участников работ с СНЧ источником Зевс.

Книга имеет междисциплинарный характер и представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся, с одной стороны, вопросами глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируруемыми источниками и, с другой стороны, вопросами дальней радиосвязи на море в сверхнизкочастотном (СНЧ) диапазоне.

Главный редактор: академик РАН Е.П. Велихов  
Заместитель главного редактора: д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский

Редакционная коллегия: М.Б. Баранник, Ю.Б. Башкуев, А.А. Жамалетдинов (председатель ред. коллегии), В.В. Колобов, В.Е. Корепанов, Т.Г. Короткова (секретарь выпуска), Ю.Д. Лисицын, С.В. Поляков, А.К. Сараев, В.Н. Селиванов, Ю.В. Фесенко, А.Н. Шевцов, Ю.Г. Щорс (зам. председателя редколлегии)

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



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

ISBN 978-5-902643-23-4 (Том 1)

© Геологический институт Кольского научного центра РАН, 2014  
© Коллектив авторов, 2014



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

# INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF ELF CONTROLLED SOURCES WITH THE IONOSPHERE AND EARTH'S CRUST

---

Collected reprints of scientific research and educational articles and reports on dual-purpose works with the "Zeus" ELF transmitter in the framework of the conversion policy of Russia

---

Volume I

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

Apatity  
2014

UDC 550.837 (834)

UDC 623:94 (47)

**Interaction of electromagnetic fields of ELF controlled sources with the ionosphere and Earth's crust.**

Proceedings of the All-Russian (with the International Participation) Research and Practice Workshop. In 2 Volumes / Russ. Acad. Sci., Depart. of Earth Sci., Geological Institute Kola Science Centre; Ed.-in-Chief Acad. RAS E.P. Velikhov, Deputy Ed.-in-Chief Dr.Sci. Yu.L. Voytekhovskiy. - Apatity, 2014. – 206 pp.

ISBN 978-5-902643-23-4 (Vol. I)

The book provides reprints of published scientific articles, open-press theses of reports on the experience of scientific and applied works with the “Zeus” extreme low-frequency (ELF) antenna. The book consists of five chapters and a photo gallery. Chapter I presents works with theoretical calculations. Chapter II provides results of experiments with the “Zeus” ELF antenna in Russia and abroad. Chapter III is dedicated to the up-to-date and still outstanding issue of monitoring earthquakes and lunar-solar tidal phenomena using the ELF field of the “Zeus” source. Chapter IV discusses elaboration of methods and techniques of the electromagnetic field excitation and registration. Standing out in the book is Chapter V. It comprises publicist articles, reports and memoirs of those who worked with the “Zeus” ELF source.

The book is interdisciplinary and intended for a wide range of experts in the deep electromagnetic sounding using powerful controlled sources on the one hand, and the ones specializing in the distant radio communication at sea in extreme low-frequency (ELF) range on the other hand.

Editor-in-Chief: Academician E.P. Velikhov  
Deputy Editor-in-Chief: Dr.Sci. Yu.L. Voytekhovskiy

Editorial Board: M.B. Barannik, Yu.B. Bashkuev, A.A. Zhamaletdinov (Editorial Board Chairman),  
V.V. Kolobov, V.E. Korepanov, T.G. Korotkova (Volume Secretary), Yu.D. Lisitsyn, S.V. Polyakov, A.K. Saraev,  
V.N. Selivanov, Yu.V. Fesenko, A.N. Shevtsov, Yu.G. Shchors (Deputy Editorial Board Chairman)

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



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

ISBN 978-5-902643-23-4

© Geological Institute KSC RAS, 2014  
© Authors, 2014

## Содержание

<b>Предисловие.</b> Жамалетдинов А.А. ....	11
<b>Глава 1. Методы и результаты теоретических расчётов распространения СНЧ-радиоволн в волноводе «Земля-ионосфера».....</b>	15
Шевцов А.Н. (1990). О некоторых способах нормировки и трансформации результатов электромагнитных зондирований.....	15
Saraev A.K., Kostkin P.M.(1997). Structure of ELF radio station electromagnetic field.....	19
Saraev A.K., Ivochkin V.G., Kostkin P.M., Kocherov A.B. (1997) Experimental and theoretical researches of polarization features of the ELF radio station electromagnetic field.....	19
Kostkin P.M., Morozova O.M., Saraev A.K. (1997) Software for calculations of electromagnetic fields of the ELF radio station in the plane waveguide “Earth-Ionosphere”.....	20
Сараев А.К., Косткин П. М. (1998). Структура электромагнитного поля радиостановки.....	20
Сараев А.К., Косткин П. М., Ивочкин В.Г. (1998). Особенности поляризации электромагнитного поля СНЧ-радиостановки. ....	34
Zhamaletdinov A.A., Shevtsov F.N., Pertel' M.I.(1998). Electromagnetic sounding and monitoring in the field of ELF antenna with taking into account the influence ionosphere and displacement currents. ....	40
Zhamaletdinov A. A., A. N. Shevtsov, A. D. Tokarev, Yu. M. Kononov, L. L. Van'yan (1999.) Influence of the Ionosphere and Bias Currents upon the Results of Deep Electromagnetic Soundings in the ELF Antenna Field....	40
Saraev A.K., Kostkin P.M. (2000). Waveguide zone of powerful source of electromagnetic fields. ....	44
Sobchakov L.A., Astakhova N.L., Polyakov S.V. (2003) Excitation of electromagnetic waves in a plane waveguide with anisotropic upper wall. ....	44
Шевцов А.Н. (2006). Прямая и обратная задачи частотных электромагнитных зондирований с промышленными линиями электропередачи. ....	52
<b>Глава 2. Экспериментальные исследования взаимодействия СНЧ-радиоволн с земной корой. ....</b>	63
Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. (1994). Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ - диапазона.....	63
Сараев А.К., Собчаков Л.А., Васильев А.В., Жамалетдинов А.А., Песин Л.Б. (1996) Перспективы использования СНЧ-радиостановки для решения геолого-геофизических задач. ....	66
Гохберг М.Б., Сараев А.К., Пертель М.И. (1999). Исследования ионосферных возмущений, вызванных карьерными взрывами в диапазоне сверхнизких частот. ....	67
Saraev A.K., Pertel M.I., Kocherov A.B., Kharlamov M.M., Zgao Guoze, Tang Ji, Wang Jijun, Deng Qianhui, Zhao Junmeng. (2000). Measurements of electromagnetic field generated by the Russian ELF transmitter in China at the distance of 7000 km. ....	74
Сараев А.К., Пертель М.И., Кочеров А.Б., Косткин П.М., Харламов М.М., Чжао Гуозэ, Танг Джи, Денг Кианху, Чжао Джунменг, Ванг Джиюн.(2004). Оценка возможностей геофизического использования сигналов Российской СНЧ-радиостановки «Зевс» в Китае. ....	74
Ermakova E.N., Kotik D.S., Polyakov S.V., T. Bosinger, Sobchakov L.A. (2006). A power line as a tunable ULF-wave radiator: Properties of artificial signal at distances of 200 to 1000 km. ....	78
Zhamaletdinov A.A., Petrishchev M.S., Shevtsov A.N., Kolobov V.V. , Selivanov V.N., Esipko O.A., Kopytenko E.A., Grigorjev V.F. (2013). Electromagnetic Sounding of the Earth's Crust in the Vicinities of the SG-6 and SG-7 Superdeep Boreholes in the Fields of Natural and Powerful Controlled Sources. ....	88

<b>Глава 3. СНЧ-мониторинг землетрясений и лунно-солнечных приливных явлений.....</b>	<b>92</b>
Сараев А.К., Пертель М.И., Парфентьев П.А., Прокофьев В.Е., Харламов М.М., Собчаков Л.А., Васильев А.В., Песин Л.Б.(1996). Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей СНЧ-радиостановки для целей прогноза землетрясений на Северном Кавказе.....	92
Сараев А.К., Пертель М.И. (1996). Перспективы использования низкочастотных электромагнитных полей мощных источников для прогноза землетрясений.....	92
Saraev A.K., Pertel M.I., Kocherov A.B., Kadyshevich G.M., Nikiforov A.B. (1998) Application of the ELF radio station to seismic activity monitoring. ....	93
Сараев А.К., Пертель М.И., Малкин З.М. (1998). Проявление деформаций земной коры, вызванных приливами в изменениях импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиостановки. ....	94
Сараев А.К., Пертель М.И., Парфентьев П.А., Прокофьев В.Е., Харламов М.М. (1999). Экспериментальные исследования электромагнитного поля СНЧ-радиостановки для целей мониторинга сейсмической активности на Северном Кавказе. ....	102
Zhamaletdinov A. A., F. P. Mitrofanov, A. D. Tokarev, and A. N. Shevtsov (2000) The Influence of Lunar and Solar Tidal Deformations on Electrical Conductivity and Fluid Regime of the Earth's Crust. ....	109
Сараев А.К., Пертель М.И., Малкин З.М. (2006). Опыт изучения приливных вариаций кажущегося сопротивления в аудиочастотном диапазоне. ....	114
<b>Глава 4. Методика и техника возбуждения и регистрации СНЧ электромагнитного поля.....</b>	<b>121</b>
E. P. Velikhov, A. A. Zhamaletdinov, A. N. Shevtsov, A. D. Tokarev, Yu. M. Kononov, L. B. Pesin, G. M. Kadyshevich, M. I. Pertel', and A. V. Veshchev (1998). Deep Electromagnetic Studies with the Use of Powerful ELF Radio Installations. ....	121
Ивочкин В.Г., Сараев А.К. (1998). Аппаратура электромагнитного профилирования с использованием техногенных полей ЛЭП различного назначения. ....	138
Fraser-Smith Antony C. & Bannister Peter R. (1998). Reception of ELF signals at antipodal distances. ....	144
Belyaev P.P., Polyakov S. V., Ermakova E. N., Isaev S. V., Yakunin M. N., Sobchakov L. A., Vasilyev A.V., Astakhova N. L., Vladimirov D. N., Volosevich V. S., Protopopov L. N., Gordyushkin, S. M. Savitsky A.P., Red'ko G. V., Eliseev A. A., Fedorov A. B. and Ratnikov K.D. (2002). First Experiments on generating and receiving artificial ULF (0/3 – 12 Hz) emission at distance of 1500 km. ....	149
Сараев А.К., Денисов Р.В., Шлыков А.А., Головенко В.Б., Ларионов К.А., Васильев А.В., Владимиров Д.Н., Астахова Н.Л. (2011). Особенности метода CSAMT с мощным источником. ....	158
Колобов В.В., Баранник М.Б., Жамалетдинов А.А. (2013). Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон (монография). ....	161
<b>Глава 5. СНЧ радиопередающая установка ЗЕВС двойного назначения в научно-популярных изданиях, докладах и воспоминаниях участников. ....</b>	<b>165</b>
Жамалетдинов А.А. (1995) Перспективы и первые результаты глубинных электромагнитных зондирований с применением низкочастотных радиостановок. ....	165
Блинова Алина. Зевс двойного применения. ....	167
Жамалетдинов А.А. (1996). "Зевс" на службе у моряков и геофизиков. ....	167
Кононов Ю.М. (1996) Связь на военно-морском флоте. ....	168
Svanhovd Environment Centre (1997), Svanvik, Norway. Information about electric line "ZEVS". ....	170
Кононов Ю.М., Жамалетдинов А.А. (2002). Systems of ELF communication and environment control - the perspective direction of conversion policy in Russia. ....	171
Фесенко Ю.В. (2011). Создание новой радиолинии связи. Из книги «Во имя будущего вспомним» (2011) под ред. Кононова Ю.М. ....	174

Мольков А.В.(2011). 25 лет работы объекта «Зевс».....	177
Понятова А. (2013). Что обнаружила «СУРА». Из статьи «Зачем греют небо. Мифы и правда.».....	178
Тронд Якобсен (2013). Зевс, Российский СНЧ-передатчик на частоте 82 Гц. Система излучения крайне низкой частоты, использующая сверхдлинные волны. (Перевод с английского).....	179
Лисицын Ю.Д. (2013). Первые отечественные эксперименты по созданию приемно-передающих систем СНЧ-радиосвязи на морских объектах. ....	186
Комлева Е.В. (2013). Геология, горное дело и ядерная энергия (выдержка из статьи).....	187
Башкуев Ю.Б. (2013). Воспоминания участника СНЧ - работ в Забайкалье в 1977 – 1991 годах.....	187
Жамалетдинов А.А. (2013). Краткие воспоминания участника работ с СНЧ-антенной «Зевс» по двойному назначению в 1990-2013 годах.....	190
Глава 6. <b>Фотогалерея</b> .....	196
Список авторов статей.....	203
Список участников работ с СНЧ-источником «Зевс» .....	204



## Contents

<b>Preface</b> Zhamaletdinov A.A. ....	11
<b>Chapter 1. Methods and Results of Theoretical Calculations of the ELF Radiowaves Propagation Within the «Earth-Ionosphere» Waveguide.....</b>	15
Shevtsov A.N. (1990). On some methods of normalization and the transformation of the results of electromagnetic soundings. ....	15
Saraev A.K., Kostkin P.M.(1997). Structure of ELF radio station electromagnetic field. ....	19
Saraev A.K., Ivochkin V.G., Kostkin P.M., Kocherov A.B. (1997) Experimental and theoretical researches of polarization features of the ELF radio station electromagnetic field. ....	19
Kostkin P.M., Morozova O.M., Saraev A.K. (1997) Software for calculations of electromagnetic fields of the ELF radio station in the plane waveguide “Earth-Ionosphere”. ....	20
Saraev A.K., Kostkin P. M (1998). The structure of electromagnetic field of the radio installation. ....	20
Saraev A.K., Kostkin P.M., Ivochkin V.G. (1998). Peculiarities of electromagnetic field polarization of the ELF-radioinstallation. ....	34
Zhamaletdinov A. A., A. N. Shevtsov, A. D. Tokarev, Yu. M. Kononov, L. L. Van’yan (1999.) Influence of the Ionosphere and Bias Currents upon the Results of Deep Electromagnetic Soundings in the ELF Antenna Field. ...	40
Zhamaletdinov A.A., Shevtsov F.N., Pertel’ M.I.(1998). Electromagnetic sounding and monitoring in the field of ELF antenna with taking into account the influence ionosphere and displacement currents. ....	40
Saraev A.K., Kostkin P.M. (2000). Waveguide zone of powerful source of electromagnetic field. ....	44
Sobchakov L.A., Astakhova N.L., Polyakov S.V. (2003) Excitation of electromagnetic waves in a plane waveguide with anisotropic upper wall. ....	44
Shevtsov A.N. (2006). Direct and inverse problems of frequency electromagnetic soundings with industrial power transmission lines. ....	52
<b>Chapter 2. Experimental Research of the ELF Field Interaction with the Earth's Crust.....</b>	63
Velikhov E.P., Zhamaletdinov A.A., Sobchakov L.A., Veshev A.V., Sarayev A.K., Tokarev A.D., Shevtsov A.N., Vasil'yev A.V., Sonnikov A.G., Yakovlev A.V. (1994). Extra-Low Frequency sounding of the Earth's crust with a high-power antenna. ....	63
Saraev A.K., Sobchakov L.A., Vasilyev A.V., Zhamaletdinov A.A., Pesin L.B. (1996). Prospects of use of the ELF radio installation for the solution of geological and geophysical problems. ....	66
Gokhberg M.B., Saraev A.K., Пертель M.I. (1999). Studies of ionospheric disturbances caused by quarry explosions in the range of Ultra-Low Frequencies. ....	67
Saraev A.K., Pertel M.I., Kocherov A.B., Kharlamov M.M., Zgao Guoze, Tang Ji, Wang Jijun, Deng Qianhui, Zhao Junmeng. (2000). Measurements of electromagnetic field generated by the Russian ELF transmitter in China at the distance of 7000 km. ....	74
Saraev A.K., Pertel’ M.I., Kocherov A.B., Kostkin P.M., Kharlamov M. M., Zgao Guoze, Tang Ji, Deng Qianhui, Zhao Junmeng., Wang Jijun.(2004). Assessment of possibilities of geophysical use of signals of the russian ELF radio insalling «Zeus» in China. ....	74
Ermakova E.N., Kotik D.S., Polyakov S.V., T. Bosinger, Sobchakov L.A. (2006). A power line as a tunable ULF-wave radiator: Properties of artificial signal at distances of 200 to 1000 km. ....	78
Zhamaletdinov A.A., Petrishchev M.S., Shevtsov A.N., Kolobov V.V. , Selivanov V.N., Esipko O.A., Kopytenko E.A., Grigorjev V.F. (2013). Electromagnetic sounding of the Earth’s Crust in the vicinities of the SG-6 and SG-7 superdeep boreholes in the fields of natural and powerful controlled sources. ....	88
<b>Chapter 3. ELF-Monitoring of Earthquakes and Lunar-solar Tidal Phenomena.....</b>	92
Saraev A.K., Pertel’ M.I., Parfentiev P.A., Prokofiev V.E., Kharlamov M.M., Собчаков L.A., Vasilyev A.V., Pesin L.B. (1996). Results of experimental studies of electromagnetic fields from ELF radio installation for the purposes of earthquakes forecasting in the North Caucasus. ....	92

Saraev A.K., Pertel' M.I. (1996). Prospects for the use of Extra Low-Frequency electromagnetic field of high-power sources for the earthquakes forecasting. ....	92
Saraev A.K., Pertel' M.I., Kocherov A.B., Kadyshevich G.M., Nikiforov A.B. (1998) Application of the ELF radio station to seismic activity monitoring. ....	93
Saraev A.K., Pertel' M.I., Malkin Z.M. (1998). Manifestation of the tidal earth's crust deformations in a changes of impedance of electromagnetic field of ELF radio installation.....	94
Saraev A.K., Pertel' M.I., Parfentiev P.A., Prokofiev V.E., Kharlamov M. M. (1999). Experimental studies of electromagnetic field of the ELF radio installation for monitoring of seismic activity in the North Caucasus. ....	102
Zhamaletdinov A. A., Mitrofanov F. P., Tokarev A.D. and Shevtsov A.N. (2000) The Influence of Lunisolar Tidal Deformations on Electrical Conductivity and Fluid Regime of the Earth's Crust. ....	109
Saraev A.K., Pertel' M.I., Malkin Z.M. (2006). Experience in the study of tidal variations of apparent resistivity in the audio frequency range. ....	114
<b>Chapter 4. Methods and Technique of Excitation and Registration of the ELF Electromagnetic Field. ....</b>	<b>121</b>
Velikhov Ye.P., Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Tokarev A.D., Kononov Yu.M., Pesin L.B., Kadyshevich G.M., Pertel' M.I. and Veshchev A.V. (1998). Deep electromagnetic studies with the use of powerful ELF radio Installations. ....	121
Ivochkin V.G, Saraev A.K. (1998). Equipment for electromagnetic profiling with the use of power transmission lines of various purposes. ....	138
Fraser-Smith Antony C. & Bannister Peter R. (1998). Reception of ELF signals at antipodal distances. ....	144
Belyaev P.P., Polyakov S. V., Ermakova E. N., Isaev S. V., Yakunin M. N., Sobchakov L. A., Vasilyev A.V., Astakhova N. L., Vladimirov D. N., Volosevich V. S., Protopopov L. N., Gordyushkin, S. M. Savitsky A.P., Red'ko G. V., Eliseev A. A., Fedorov A. B. and Ratnikov K.D. (2002). First Experiments on generating and receiving artificial ULF (0/3 – 12 Hz) emission at distance of 1500 km. ....	149
Saraev A.K., Denisov R.V., Shlykov A.A., Golovenko V.B., Larionov K.A., Vasilyev A.V., Vladimirov D.N., Astakhova N.L. (2011). Features of the CSAMT technique with a powerful source. ....	158
Kolobov V.V., Barannik M.B., Zhamaletdinov A. A. (2013). Generator-measuring complex «Energy» for electromagnetic sounding of the lithosphere and monitoring of seismically active zones (monograph). ....	161
<b>Chapter 5. The dual-purpose “Zeus” ELF transmitter in educational publications, reports and memoirs of performers.....</b>	<b>165</b>
Zhamaletdinov A.A. (1995). Prospects and first results of the deep electromagnetic sounding with the use of Low Frequency radioinstallations. ....	165
Blinova Alina (1995). Zeus of dual application. ....	167
Zhamaletdinov A.A. (1996). "Zeus" on service for sailor and geophysics. ....	167
Kononov Yu.M. (1996) The communication upon navies. ....	168
Svanhovd Environment Centre (1997), Svanvik, Norway, March.1996. Information about electric line “ZEUS”. ....	170
Kononov Yu.M. & Zhamaletdinov A.A. (2002). The systems of ELF-radio communication and monitoring of environment - a perspective direction of conversion politicians to Russia. ....	171
Fesenko Yu.V. (2011). Creation of the new radio communication line. From the book "For the sake of the future we will remember" (2011) under the editorship of Kononov Yu.M. ....	174
Mol'kov A.V. (2011). 25 years of the functioning of the object "Zeus". ....	177
Ponyatova A. (2013). What the "SURA" have found?. From article " Why they heat the sky. Myths and truth." ...	178
Trond Jacobsen. Zevs, the Russian 82 Hz ELF transmitter. A Extrem Low Frequency transmission-system, using the real long waves.....	179
Lisitsyn Yu.D. (2013). The first domestic experiments on creation of send-receive systems of the ELF-radio communication on sea objects. ....	186

Komleva E.W. (2013). Geology, mining and nuclear energy (an excerpt from the article).....	187
Bashkuyev Yu.B. (2013). Memoirs of the participant of ELF - works in Transbaikalia in 1977 – 1991. ....	187
Zhamaletdinov A.A. (2013). Short memoirs of the participant of works with the Zeus ELF-antenna on a dual purpose in 1990-2013. ....	190
<b>Chapter 6. Photo Gallery. ....</b>	<b>196</b>
The list of the authors of articles.....	203
The list of participants of researches with ELF source "Zeus".....	204

## Предисловие

В конце 60-х, начале 70-х годов возникло, и начало активно развиваться новое направление в технике дальней связи на Военно-морском флоте – разработка средств коммуникации с подводными лодками, находящимися в погруженном состоянии в океанских глубинах или же под арктическими льдами. Необходимость решения этой задачи определялась, прежде всего тем, что подводный флот к тому времени пополнился атомными подводными лодками (АПЛ), рассчитанными на длительное пребывание под водой и на практически кругосветные плавания. Задачей номер один в этих условиях стала необходимость передачи команд в любую точку мирового океана на АПЛ, находящиеся в условиях полной скрытности на глубинах в десятки и первые сотни метров. Решением этой проблемы стало создание систем радиосвязи на сверхнизких частотах (СНЧ), причем в довольно узком частотном диапазоне. Несущая частота в этом случае должна быть достаточно низкой, чтобы электромагнитное поле не успело затухнуть на требуемой глубине связи. В то же время, несущая частота должна быть достаточно высокой, чтобы энергия электромагнитной волны не рассеивалась за пределы ионосферного зеркала и могла обеспечивать глобальную связь. В России было принято решение создать источник СНЧ радиосвязи на частоте 82 Гц и расположить его на Мурманском блоке земной коры, на территории Кольского полуострова. Выбор места расположения СНЧ-источника определялся требованием, чтобы под антенной (горизонтальная заземленная линия длиной порядка 60 км) находилось плохо проводящее, достаточно однородное основание. В этом случае антенна (горизонтальный магнитный диполь) обладает наибольшим магнитным моментом на частоте излучения. Созданная на Кольском полуострове установка получила кодовое название «Зевс». Аналогичный источник на частоте 76 Гц был создан в США в районе Великих озер. Одно из его кодовых названий «Сангвин».

Разработка и создание источника «Зевс» явилось сложной проблемой, потребовавшей решения целого ряда нестандартных теоретических и инженерных задач. В этой работе объединились управление Дальней связи ВМФ России, НИО им. Коминтерна (ныне Российский институт мощного радиостроения, РИМР), НИИ постоянного тока, Институт земной коры и НИИФ Санкт-Петербургского государственного университета, Нижегородский радиофизический институт и др. С самого начала эксплуатации установка «Зевс» находилась под строжайшим секретом. Поэтому подробности ее создания, несмотря на уникальность ее технических характеристик, долгое время не публиковались в открытой печати. Однако со временем, с начала 90-х годов, проблема секретности потеряла актуальность, так как работа установки и все ее параметры прекрасно прослушивались западными спецслужбами, а все детали ее расположения просматривались космическими аппаратами. В связи с этим на повестку дня выступила возможность использования СНЧ источника «Зевс» по бинарной схеме – не только в целях оборонной промышленности, но и для решения мирных, народно-хозяйственных задач. Это направление горячо поддержал академик РАН Владимир Александрович Котельников, долгое время возглавлявший научный совет РАН по комплексной проблеме «Радиофизические методы исследования морей и океанов».

Предлагаемая читателю книга представляет собой первую попытку собрать воедино репринты ранее опубликованных научных статей, тезисов докладов и сообщений в широкой печати, посвященных опыту научно-исследовательских и прикладных работ с источником «Зевс» по двойному назначению. Книга состоит из пяти глав и фотогалереи. Репринты приведены на языке их публикации – на русском или английском. Там, где это было возможно, приведены опубликованные переводы статей на английский язык со ссылками на русско-язычные оригиналы. Содержание книги приведено в двух вариантах: первый вариант с русскими и английскими названиями, второй вариант – только с английскими. Все публикации по главам приведены в хронологическом порядке.

В первой главе книги представлены расчетно-теоретические работы, посвященные, главным образом, изучению условий распространения СНЧ радиоволн в волноводе Земля-ионосфера. В отличие от классических работ С. Бернштейна и др. (1974), В. Акиндинова и др. (1976), Г. Макарова и др. (1993) и многих других, посвященных глобальному распространению электромагнитных волн в сферическом волноводе с однородными стенками, здесь рассматриваются плоские модели Земли и ионосферы. Это особенно важно при изучении глубинного строения Земли с применением СНЧ-волн, так как позволяет построить решения с учетом слоистого строения стенок волновода. Необходимо заметить, что рассмотренные в главе 1 решения для плоской модели справедливы лишь для удалений до 2000 км от источника. В первую главу включены также работы, в которых рассмотрены расчеты

нормального поля заземленной линии, приведены решения прямой и обратной задачи электромагнитного зондирования и др.

Во второй главе приводятся результаты экспериментальных исследований с использованием СНЧ антенны «Зевс». Начало этим работам положили СНЧ зондирования, выполненные в 1992 году в Южной Финляндии [Velikhov et al., 1994]. Особый интерес представляют СНЧ работы, выполненные в Китае на удалении до 7000 км от «Зевса» [Сараев и др., 2000] и в нефтегазоносных провинциях Западной Сибири [Zhamaletdinov et al. 2013].

Третья глава посвящена актуальной и до конца не решенной проблеме мониторинга землетрясений и лунно-солнечных приливных явлений с использованием СНЧ поля источника «Зевс». Первые работы в этом направлении были выполнены сотрудниками НИИЗК СПбГУ [Сараев и др. 1996, 1998, 1999, 2006] и позднее их коллегами из Геологического института КНЦ РАН [Zhamaletdinov et al., 2000].

Важное место в СНЧ-тематике занимает разработка методики и техники возбуждения и регистрации электромагнитного поля. Этим вопросам посвящены материалы 4-й главы. Наряду с аппаратурными вопросами [Ивочкин, Сараев, 1998; Колобов и др. 2013], в ней большое внимание уделено методике наблюдений и анализа полученных результатов. Особого внимания заслуживает статья П.П. Беляева, С.В. Полякова и др. (2002), посвященная первому опыту излучения и регистрации сигналов КНЧ диапазона на частотах в единицы и первые десятки Гц на удалении до 1500 км. Отметим, что главными инициаторами исследований в КНЧ-диапазоне явились Леонид Авраамович Собчаков и Лев Борисович Песин. Участие Л.Б. Песина нашло отражение в статье Ю.В. Фесенко в 5-й главе. Интересна статья Антони Фразер-Смита с Петером Баннистером (1998), посвященная результатам «подслушивания» источника Зевс американскими измерительными системами в разных частях мирового океана, в том числе в районе Антарктиды. На основе проведенного анализа ими сделан вывод, что российский СНЧ-радиопередатчик «Зевс» на частоте 82 Гц мощнее на 10 Дб в сравнении с американским радиопередатчиком на частоте 76 Гц.

Особое место в книге занимает пятая глава. В ней собраны публицистические статьи, доклады и воспоминания участников работ с СНЧ-источником Зевс. Основная направленность материалов главы связана с применением СНЧ-радиопередающей установки «Зевс» по двойному назначению – для обороны страны и для народного хозяйства. Эта проблема рассмотрена как в отечественных публикациях [Жамалетдинов, 1995, 1996; Кононов, Жамалетдинов, 2002; Мольков, 2011], так и в зарубежных [Т. Якобсон, 2013, Комлева. 2013]. Статья Тронда. Якобсена дана в переводе с английского. В ней в популярной форме рассмотрен широкий спектр вопросов: от способов конструирования СНЧ-установки и генерации радиопередающих сигналов до рассмотрения способов кодирования полезной информации и проблем экологии среды. В главе 5 можно также найти материал об альтернативном варианте передачи информации в КНЧ-СНЧ-диапазоне с использованием установок нагрева ионосферы [Понятова, 2013]. В заключительной части пятой главы приведены воспоминания непосредственных участников СНЧ-работ (Ю.В. Фесенко, Ю.Д. Лисицына, Ю.Б. Башкуева и ряда других) о своих коллегах, о трудностях, которые им приходилось преодолевать при создании и эксплуатации СНЧ-систем, и о тех результатах, которые им удалось получить.

Книгу 1 заключает фотогалерея с коллективными фотографиями участников и со снимками отдельных эпизодов работ, а также список участников работ в алфавитном порядке с указанием страниц, на которых имеются соответствующие упоминания в книге. Книга 1 издается в преддверии Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара «Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой». Материалы семинара по докладам, которые еще предстоит заслушать, будут изданы в виде книги 2.

Настоящее издание подготовлено к печати при поддержке гранта РФФИ офи-м 13-05-12044.

Председатель редколлегии А.А. Жамалетдинов

## Preface

The late 1960's-early 1970's saw the dawn and rise of a new trend in the distant communication technique in the Navy, i.e. developing media of communication with submarines submersed in oceanic depths or under the Arctic ice. The necessity to solve the problem was determined by the Navy having obtained nuclear submarines (NS) intended for long underwater travelling and almost all-year-round voyages. In these conditions, task No. 1 proved transmitting orders to any part of the World Ocean to NS that travel top secretly at depths of tens and first hundreds of meters. Elaboration of radio communication systems using an extreme, and quite narrow, low-frequency (ELF) range, solved this problem. In this case a carrier frequency should have been low enough for the electromagnetic field not to fade at certain communication depth. At the same time, the carrier frequency should have been high enough for an electromagnetic scattering energy not to exceed the ionosphere mirror and be able to provide the global connection. The Russians made a decision to create an ELF radio communication source using the frequency of 82 Hz and set it on the Murmansk block of the Earth's crust, on the territory of the Kola Peninsula. The choice of the ELF source location was predetermined by the need of an antenna (about 60 km-long horizontal ground line) to have a poor-conductive, quite heterogeneous basement underneath. In this case the antenna (horizontal magnetic dipole) performs the maximum magnetic moment on the radiation frequency. The installation created on the Kola Peninsula was given the code name of "Zeus". The similar source on the frequency of 76 Hz was created in USA, in the Great Lakes area. One of its code names is "Sanguine".

Elaborating and creating the "Zeus" source proved quite a challenge that demanded solving a number of no ordinary theoretical and engineering tasks. The work united the Naval Telecommunication Centre of Russia, Komintern's Scientific Production Association (now the Russian Institute for Powerful Radiobuilding, RIPR), JSC High Voltage Direct Current Power Transmission Research Institute, Institute of the Earth's Crust and Institute of Physics of the Saint Petersburg State University, Radiophysical Research Institute in Nizhny Novgorod, etc. Exploiting the "Zeus" transmitter had been kept top secret right from the start. That's why details of its creation, despite its technical characteristics being unique, had not appeared in the open press for a long time. However, from the beginning of the 1990's there was no longer need in vitamizing the secrecy ground of the matter, since the operation and parameters of the transmitter came well tapped by the western secret services, and all the details of its location could be seen via the space surveillance. It limelighted the opportunity of double use of the "Zeus" ELF source, i.e. not only for the sake of the defense industry, but also to meet non-military national economy tasks. This idea was backed up by Academician RAS Vladimir Aleksandrivich Kotelnikov, who long headed the Scientific Board RAS on complex theme "Radiophysical methods of investigating seas and oceans".

The current book is a first attempt at puzzling reprints of earlier published scientific articles, open-press theses of reports and presentations on the experience of scientific and applied works with the "Zeus" for two purposes. The book consists of five chapters and a photo gallery. The reprints are provided in the original publication language, either Russian or English. Where possible, published translations of articles into English with references to the Russian original are provided. The book contents are given in two patterns – the first one with titles both in Russian and in English, the second one in English only. All publications in chapters are chronologically ordered.

Chapter I provides theoretical calculation works, most of them analyzing conditions of the ELF radiowaves scattering within the Earth-ionosphere waveguide. Unlike classic works by S. Bernstein et al. (1974), V. Akindinova et al. (1976), G. Makarova et al. (1993) and many others dedicated to the propagation of electromagnetic waves within a spherical waveguide with heterogonous walls, here we treat flat models of the Earth and ionosphere. It is particularly important for the Earth's deep structure study with ELF waves, since it allows making decisions taking into account bedded patterns of the waveguide walls. Notably, the solutions for the flat model highlighted in Chapter I are true only for the objects up to 2000 km away from the source. Also, Chapter I contains papers with calculations of a normal field of a ground line and provides patterns of direct and converse electromagnetic sounding, etc.

Chapter II presents results of experiments with the "Zeus" ELF antenna. ELF soundings in South Finland in 1992 [Velikhov et al. 1994] set the ball of these works rolling. Particularly interesting are the ELF works made in China at the distance of up to 7000 km from the "Zeus" [Saraev et al., 2000] and in oil-and-gas-bearing provinces of the Western Siberia [Zhamaletdinov et al., 2013].

Chapter III is dedicated to the up-to-date and still outstanding issue of monitoring earthquakes and lunar-solar tidal phenomena using the ELF field of the "Zeus" source. First works in this direction were made by employees of the Institute of the Earth's Crust of the Saint Petersburg State University [Saraev et al., 1996, 1998, 1999, 2006].

Developing methods and techniques of the electromagnetic field excitation and registration is important in ELF research. Chapter IV is dedicated to these issues. Along with equipment matters [Ivochkin, Saraev, 1998; Kolobov et al., 2013], it focuses on the methods of observation and analysis of the obtained results. The article by P.P. Belyaev, S.V. Polyakov et al. (2002) deserves particular attention. It outlines the first experience of radiation and registration of ELF signals within the range of first tens of Hz, at the distance of up to 1500 km. Notably, the investigations within the ELF range were mainly promoted by Leonid Avraamovich Sobchakov and Leo Borisovich Pesin. The latter's contribution is reflected in Yu.V. Fesenko's article in Chapter V. Deserving particular attention is the article by Antony Fraser-Smith and Peter Bannister (1998) on results of the "Zeus" source being tapped by American measuring systems

in different parts of the World Ocean, the Antarctica area inclusive. On the basis of the carried research the authors concluded the Russian “Zeus” ELF source to be on 10 Decibel more powerful on the frequency of 82 Hz than an American transmitter on the frequency of 76 Hz.

Standing out in the book is Chapter V. It comprises publicist articles, reports and memoirs of those who actually worked with the “Zeus” ELF source. Materials of this chapter mostly focus on the dual-purpose use of the “Zeus” ELF transmitter, i.e. for the country defense and national economy. It is discussed both in domestic publications [Zhamaletdinov, 1995, 1996; Kononov, Zhamaletdinov, 2002; Molkov, 2011], and in foreign ones [Trond Jacobson, 2013; Komleva. 2013]. Trond Jacobsen's article is given as a translation from English into Russian. It provides a comprehensive overview of a wide spectrum of issues, from patterns of the ELF plant construction and its transmitting radio signals up to patterns of information coding and ecological matters. From Chapter V you will also gather an alternative way of transmitting information in ELF range using ionosphere heating sets [Ponyatova, 2013]. Concluding Chapter V are memories of those who actually partook in the ELF research (Yu.V. Fesenko, Yu.D. Lisitsyn, Yu.B. Bashkuyev and others) of their colleagues, challenges that they met while creating and using the ELF-systems and results that they managed to obtain.

Volume I ends up with Photo Gallery of collective pictures of participants and work moments, and also provides an alphabetically ordered list of researchers with pages of references to these in the book. Volume I is a preconference publication of the All-Russian with International Participation Research and Practice Workshop “Interaction of electromagnetic fields of ELF controlled sources with the ionosphere and Earth’s crust.”. Materials after the workshop reports to be delivered shall be published as Volume II.

The current publication is financially supported by RFBR Grant ofi-m 13-05-12044.

Editorial Board Chairman A.A. Zhamaletdinov

## Глава 1. Методы и результаты теоретических расчётов распространения СНЧ-радиоволн в волноводе «Земля-ионосфера».

**Шевцов А.Н. (1990) О некоторых способах нормировки и трансформации результатов электромагнитных зондирований. // Глубинные геоэлектрические исследования с использованием промышленных линий электропередач. Апатиты. КНЦ АН СССР, 1990. С. 90-95.**

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

В статье приводятся выражения для расчета нормального поля длинной заземленной линии (ДЗЛ) и эффективного удельного сопротивления по модулю горизонтальной составляющей вектора электрической напряженности поля над однородным полупространством.

Решение прямой задачи выполнено путем интегрирования поля горизонтального электрического диполя над однородным полупространством вдоль длинной заземленной линии (ДЗЛ). При этом рассмотрение проведено применительно к полевой методике, основанной на измерении полного горизонтального электрического поля ДЗЛ.

Введем в рассмотрение нормировку по полному полю ДЗЛ над однородным полупространством для дальней зоны. Для этого проинтегрируем  $x$  и  $y$  - компоненты электрического поля горизонтального электрического диполя над однородным полупространством (Вешев А.В., 1980; Аксенова и др., 1989) по всей протяженности линии (ДЗЛ). Поле диполя в дальней зоне над однородной средой

$$dE_x^0 = I\rho \left( 3 \frac{x^2}{r^2} - 2 \right) \frac{dx}{r^3}$$

$$dE_y^0 = I\rho \frac{3xy}{r^3} dx$$
(1)

где  $\rho$  - сопротивление однородного полупространства,  $I$  - ток в диполе,  $dx$  - длина диполя,  $x, y$  - координаты точки приема.

Интегрируя по всей длине заземленной линии, получим:

$$E_x^0 = \int_{x_A}^{x_B} dE_x^0 = \frac{I\rho}{K_{x\omega}}$$

$$E_y^0 = \int_{x_A}^{x_B} dE_y^0 = \frac{I\rho}{K_{y\omega}}$$
(2)

где геометрические коэффициенты будут (В.Ю.Аксенова и др., 1989)

$$K_{x\omega} = \frac{2\pi y^2}{\left(\frac{x_B}{r_B}\right)^3 - \left(\frac{x_A}{r_A}\right)^3 - 2\left(\frac{x_A}{r_A} - \frac{x_B}{r_B}\right)}$$

$$K_{y\omega} = \frac{2\pi y^2}{\left[\left(\frac{1}{r_B}\right)^3 - \left(\frac{1}{r_A}\right)^3\right] y^3} = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_B}\right)^3 - \left(\frac{1}{r_A}\right)^3\right] y}$$
(3)

Полное выражение для горизонтальной составляющей как обычно:

$$E_\omega^0 = \sqrt{(E_{x\omega}^0)^2 + (E_{y\omega}^0)^2},$$
(4)

индекс 0 - означает, что выражение получено для однородного полупространства (в дальнейшем его опустим), индекс  $\omega$  - что рассматривается волновая зона.

Аналогичные выражения для  $K_{x\omega}$  и  $K_{y\omega}$  были получены ранее [Вешев, 1980] путем интегрирования компонент поля гармонического диполя над однородным полупространством по всей длине ДЗЛ в средней зоне и последующим предельным переходом ( $\omega \rightarrow \infty$ ) в волновую область.

Теперь можно ввести в рассмотрение и геометрический коэффициент для полного поля ДЗЛ над однородным полупространством в волновой зоне.

Поскольку в дальней зоне по определению  $\rho_\omega \rho = 1$ ,



$$E_{x\omega} = \frac{I\rho_{\omega}^{Ex}}{K_{x\omega}} = \frac{I\rho}{K_{x\omega}}$$

$$E_{y\omega} = \frac{I\rho_{\omega}^{Ey}}{K_{y\omega}} = \frac{I\rho}{K_{y\omega}}$$
(5)

подставим эти выражения в формулу для полного поля

$$E_{\omega} = \sqrt{(E_{x\omega})^2 + (E_{y\omega})^2}$$

$$E_{\omega} = \frac{I\rho}{\sqrt{\frac{K_{x\omega}K_{y\omega}}{K_{x\omega}^2 + K_{y\omega}^2}}} = I\rho/K_{\omega}$$

$$K_{\omega} = \frac{K_{x\omega}K_{y\omega}}{\sqrt{K_{x\omega}^2 + K_{y\omega}^2}},$$
(6)

чтобы избежать особенности  $K_{y\omega} \rightarrow \infty$  при  $x_A \approx x_B$  (переход к дипольному приближению) или  $y \rightarrow 0$  (точка наблюдений на оси питающей линии), запишем

$$K_{\omega} = \frac{K_{x\omega}}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_{x\omega}}{K_{y\omega}}\right)^2}},$$
(7)

при  $x_A \approx x_B$  или  $y \rightarrow 0$ ,  $E_{y\omega} = 0$  и  $E_{\omega} = E_{x\omega}$ .

Аналогичное выражение получено для дипольного источника, где вместо  $K_{x\omega}$  и  $K_{y\omega}$  использовались выражения для параллельной  $K^{\parallel}$  и ортогональной  $K^{\perp}$  установок

$$K^{\parallel} = \frac{2\pi r^3}{L_{AB}(3\cos^2\theta - 2)}$$

$$K^{\perp} = \frac{2\pi r^3}{L_{AB}3\cos\theta\sin\theta}$$

отсюда геометрический коэффициент  $K_{\omega}^d$  для полного поля в волновой зоне над однородной землей для горизонтального электрического диполя будет:

$$K_{\omega}^d = \frac{K^{\parallel}K^{\perp}}{\sqrt{(K^{\parallel})^2 + (K^{\perp})^2}} = \frac{2\pi r^3}{L_{AB}\sqrt{4 - 3\cos^2\theta}}$$

где  $L_{AB}$  - длина питающего диполя,  $r$  - разнос,  $\theta$  - азимут на точку приема относительно оси диполя.

Точно так же можно получить геометрический коэффициент для полного поля ДЗЛ над однородным полупространством в ближней зоне

$$K_k = \frac{K_{xk}}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_{xk}}{K_{yk}}\right)^2}},$$
(8)

где

$$K_{xk} = \frac{2\pi y^2}{\left(\frac{x_B}{r_B}\right)^3 - \left(\frac{x_A}{r_A}\right)^3 - \left(\frac{x_A}{r_A} - \frac{x_B}{r_B}\right)},$$
(9)

а  $K_{yk} = K_{y\omega}$ , в силу того, что  $E_y$  - компонента не зависит от частоты для поля горизонтального, электрического диполя над однородным полупространством. Введем в рассмотрение электрические числа для полного поля длинной линии над однородным полупространством и эффективное удельное электрическое сопротивление:

$$e_{\text{tot}}^k(\omega) = \frac{\beta_{2\phi}}{\rho} = \frac{E(\omega)}{E_k}$$
(10)

$$e_{\text{tot}}^{\omega}(\omega) = \frac{\beta_{2\phi}}{\rho} = \frac{E(\omega)}{E_{\omega}},$$
(11)

здесь  $E(\omega) = \sqrt{E_x^2(\omega) + E_y^2(\omega)}$  - модуль полного вектора электрического поля как функция от частоты тока  $\omega$  в линии.

$E_x(\omega)$  -  $x$ -компонента электрического поля;  $E_y(\omega)$  -  $y$ -компонента электрического поля;  $\rho_k$  и  $E_k$  - кажущееся сопротивление и электрическое поле ДЗЛ на постоянном токе ( $\omega \rightarrow 0$ ) над однородным

полупространством,  $(\rho_k \rightarrow \rho)$ ;  $\rho_\omega$  и  $E_\omega$  - кажущееся сопротивление и электрическое поле линии в волновой зоне,  $(\rho_\omega \rightarrow \rho, \omega \rightarrow \infty)$ ,  $\rho_{\text{эф}}^{\sim}(\omega)$  - эффективное сопротивление однородного полупространства для электрического поля, возбуждаемого током в линии на частоте  $\omega$ .

Из выражений (10,11) для  $e_{\text{tot}}^k$  и  $e_{\text{tot}}^\omega$  следует, что между собой эти величины связаны через некоторый геометрический коэффициент, не зависящий от частоты, а именно  $e_{\text{tot}}^\omega(\omega) = K(x, y) e_{\text{tot}}^k(\omega)$ , где

$$K(x, y) = \frac{\rho_k(x, y)}{\rho_\omega(x, y)}.$$

Задача сводится к тому, чтобы по измеренным значениям модуля полного электрического поля  $E(\omega)$  получить эффективное сопротивление однородного полупространства  $\rho_{\text{эф}}^{\sim}(\omega)$  в зависимости от частоты  $\omega$ .

В силу определения  $e_{\text{tot}}^\omega(\omega)$

$$\tilde{\rho}_{\text{эф}}^{\sim} = \rho_\omega e_{\text{tot}}^\omega(\omega) \quad (12)$$

Найдем теперь  $e_{\text{tot}}^\omega(\omega)$  как функцию частоты. Вычислим полное поле ДЗЛ над однородной средой  $E(\omega)$  для частоты  $\omega$  и поле в волновой зоне  $E(\omega)$  для  $\omega \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} E(\omega) &= \sqrt{E_x^2(\omega) + E_y^2(\omega)} \\ E_\omega &= \sqrt{E_{x\omega}^2 + E_{y\omega}^2} \\ E_{y\omega} &= E_y = \rho / K_y, \end{aligned}$$

где

$$E_x(\omega) = E_{xk} e_x(\omega) = \rho e_x(\omega) / K_{xk} \quad (13)$$

Здесь  $E_x(\omega)$ ,  $E_y(\omega)$  - горизонтальные компоненты электрического поля ДЗЛ на частоте,

$E_{xk}$  -  $x$ -компонента электрического поля ДЗЛ для постоянного тока ( $\omega = 0$ ),

$E_{x\omega}$  -  $x$ -компонента поля ДЗЛ в волновой зоне ( $\omega \rightarrow \infty$ ),

$E_y = E_{y\omega} = E_{yk}$  -  $y$ -компонента электрического поля ДЗЛ над однородным полупространством (не зависит от частоты),

$e_{x\omega}(\omega)$  - модуль электрического числа для  $x$ -компоненты поля ДЗЛ над однородным полупространством.

Как известно,  $e_x(\omega)$  длиной заземленной линии можно представить через вещественную и мнимую части  $x$ -компоненты вектор-потенциала  $A_x$  в земле

$$e_x(\delta) = \sqrt{1 - \frac{K}{K_E} \delta^2 \text{Im}(A_x) + \left(\frac{K}{K_E}\right)^2 \frac{\delta^4}{4} \{[\text{Im}(A_x)]^2 + [\text{Re}(A_x)]^2\}} \quad (14)$$

$$\text{Re}(A_x) = \frac{1}{\delta^2} \int_{-1}^1 \frac{[(1+\delta r) \sin \delta r - \delta r \cos \delta r] e^{-\delta r}}{r^3} d\eta \quad (15)$$

$$\text{Im}(A_x) = \frac{1}{\delta^2} \int_{-1}^1 \frac{[(1+\delta r) \cos \delta r + \delta r \sin \delta r] e^{-\delta r} - 1}{r^3} d\eta, \quad (16)$$

где

$$\delta = \frac{|k_1|}{\sqrt{2}}, \quad k_1 = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\rho}} - \text{волновой параметр, } l - \text{полудлина ДЗЛ, } r = \sqrt{(\eta - x)^2 + y^2}.$$

Здесь  $\eta$ ,  $x$ ,  $y$  - безразмерные координаты (за единицу длины принята половина длины питающей линии  $l$ ).

$$K = \frac{2\pi l^2}{(1+x)/r_1^3 + (1-x)/r_2^3} = K_{xk}$$

$$r_1 = \sqrt{(\eta + x)^2 + y^2}, \quad r_2 = \sqrt{(\eta - x)^2 + y^2}, \quad K_E = \pi l^2.$$

В работе А.В. Вешева (1980) дан тщательный анализ поведения  $e_x(\delta)$ .

Интегралы (15) и (16) на практике вычисляются посредством численных методов. Хорошую скорость и точность дает метод Гаусса (для расчетов использовались микро-ЭВМ РС/ХТ и СМ-4).

Таким образом, подставляя  $E_x(\omega)$  и  $E_y$ , получим

$$E(\omega) = \sqrt{\left(\frac{\rho l e_x(\omega)}{K_{xk}}\right)^2 + \left(\frac{\rho l}{K_{yk}}\right)^2}$$

или

$$E(\omega) = \frac{\rho I}{K(\omega)},$$

где

$$K(\omega) = \frac{K_{xk}}{\sqrt{(e_x(\omega))^2 + \left(\frac{K_{xk}}{K_y}\right)^2}}$$

$K_{xk}$  и  $K_y$ , геометрические коэффициенты для  $x$  и  $y$ -компонент электрического поля ДЗЛ на постоянном токе ( $\omega=0$ ).

Подставляя выражения (5, 7) для  $E_\omega, K_\omega$  и (18) для  $E(\omega), K(\omega)$  (8) в формулу (11) для  $e_{tot}^\omega(\omega)$ , получим окончательное выражение:

$$e_{tot}^\omega(\omega) = \frac{K_\omega}{K(\omega)} = \frac{K_{x\omega}}{K_{xk}} \frac{\sqrt{(e_x(\omega))^2 + \left(\frac{K_{xk}}{K_y}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_{x\omega}}{K_y}\right)^2}}$$

Путем аналогичных выкладок можно получить и нормировку по постоянному току

$$e_{tot}^k(\omega) = \frac{\sqrt{(e_x(\omega))^2 + \left(\frac{K_{xk}}{K_y}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_{xk}}{K_y}\right)^2}}$$

Отсюда видно, что коэффициент связи между  $e_{tot}^k(\omega)$  и  $e_{tot}^\omega(\omega)$  будет

$$K(x, y) = \frac{K_{x\omega}}{K_y} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{K_{x\omega}}{K_y}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_{xk}}{K_y}\right)^2}} = \frac{K_\omega}{K_k}$$

При расчете  $e_x(\omega)$  необходимо задавать значение удельного сопротивления полупространства  $\rho$ . В зависимости от условий измерений в качестве  $\rho$  можно брать  $\rho_k$  или  $\rho_\omega$  поскольку в дальней зоне ( $\omega = \infty$ )  $\rho_\omega/\rho=1$ , а в ближней ( $\omega = 0$ )  $\rho_k/\rho = 1$ . В дальнейшем по значениям  $\rho_{эф}^\sim(\omega)$ , рассчитанным по измеренным величинам  $E(\omega)$  проводилась первичная интерпретация для определения параметров геоэлектрического разреза путем трансформации Нибле-Бостика в диапазоне частот  $\omega$  таких, что  $\rho_{эф}^\sim/\rho_\omega = 1$ , то есть в волновой зоне.

Алгоритм реализован в программах на языках Фортран-77 и Турбопэйсик. Вычисления проводились на СМ-4 и ИВН РС/ХТ. Примеры обработки экспериментальных данных приводятся в работе (Жамалетдинов, Токарев и др., 1989).

В заключение автор выражает благодарность Асмингу В.Э. за помощь в работе над статьей.

### Список литературы

1. Вешев А.В. Электромагнитное профилирование на постоянном и переменном токе. Л., "Недра". 391 с., 1980.
2. Аксенова Е.Ю., Ваньян Л.Л., Мхеидзе Б.Д., Эненштейн Б.С.. О волновой стадии становления поля в эксперименте «Волга-86». // Глубинные геоэлектрические исследования с использованием промышленных линий электропередач. Апатиты. С. 21-24, 1989.
3. Жамалетдинов А.А., Токарев А.Д., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Каменский А.А., Казанцев Н.П., Колодин Г.Н., Шевцов А.Н., Гуревич А.Е., Ковалевский В.Я., Мержеевский В.А., Тетерин В.П., Ваньян Л.Л.. Методика и результаты глубинных исследований земной коры с использованием ЛЭП ПТ 800 кВ «Волгоград–Донбасс». // Глубинные геоэлектрические исследования с использованием промышленных линий электропередач. Апатиты. С. 11-21, 1989.

**Saraev A.K. and Kostkin P.M. (1997) Structure of ELF radio station electromagnetic field.**  
//“Actual problems in deep EM studies” Russian-German seminar, Moscow, March 11-15, 1997,  
page 29. /theses/

Earth Crust Institute, State University, St. Petersburg, aks@AS1002.spb.edu

One of perspective directions of deep electrical prospecting is the use of the ELF radio station as a harmonic electromagnetic field source at extremely low frequency soundings. At calculations and analysis of the structure of electromagnetic field the antenna system of the radio station is approximated by grounded at the ends a finite length cable. On relatively small distances from this source the calculations of normal electromagnetic fields can be made under the low-frequency formulas for the half-space, and at removed distances it is necessary to use the solution of the problem in view of displacement currents and influence of the ionosphere.

For frequency of 80 Hz, resistivities of the earth and ionosphere accordingly  $10^4$  and  $10^5$  Ohm·m, antenna length 60 km and altitude of the ionosphere of 90 km calculations in view of displacement currents for components  $E_x$  and  $H_y$  (the axis  $x$  is directed along, and axis  $y$  - across of the cable) are necessary since distances of 300 km on a direction across and 600 km on a direction along the cable, and the influence of the ionosphere is necessary to take into account since distances 100 km on a direction along and 200 km on a direction across the cable. The evaluations are indicated for 10 % differences of appropriate values of field components.

At calculations under the low-frequency formulas for indicated above parameters and distance more than 200 km the components  $E_x$  and  $H_y$  on the direction across the cable twice exceed appropriate values for the direction along the cable. On the contrary, at calculations in view of displacement currents and the influence of the ionosphere the components  $E_x$  and  $H_y$  since distance of 600 km on the direction along the cable exceed appropriate values for the direction across the cable (five times on distance of 3000 km). These features of the directional diagram of ELF- station are confirmed by data of experimental measurements.

Using results of calculations areas around the cable are allocated, in which at the determination of effective resistivity  $\rho$  on impedances  $E_x/H_y$  and  $E_y/H_x$  it is possible to use approximation of a plane wave. For the impedance  $E_x/H_y$  favorable at determination  $\rho$  are the areas, located in the equatorial part and along the cable and removed from the cable (on an axis  $y$ ) or from grounding (on an axis  $x$ ) for indicated parameters at distances more than 30 km. For the impedance  $E_y/H_x$  favorable at the  $\rho$  determination are the areas, located under angles  $45^\circ$  relatively the cable. Influence of the ionosphere results in narrowing of favorable areas for an impedance  $E_x/H_y$  for the direction across the cable, and to the extension of these areas for the direction along the cable.

---

---

**Saraev A.K., Ivochkin V.G., Kostkin P.M., Kocherov A.B. (1997) Experimental and theoretical researches of polarization features of the ELF radio station electromagnetic field** //“Actual problems in deep EM studies” Russian-German seminar, Moscow, March 11-15, 1997, page 30.  
/theses/.

Earth Crust Institute. State University, St.-Petersburg, aks@AS1002.spb.edu

For study of polarization features of the EM fields generated by the ELF radio station, located on the Kola Peninsula, experimental circle measurements at various distances from the source were executed: on the Kola Peninsula (Apatity station, distance 150 km), in Karelia (Voknavolok, 470 km), on the Karelian Isthmus (Vuoksa, 950 km).

Electrical  $E$  and magnetic  $H$  field components at frequency 80 Hz were measured with the step in rotation angle of  $15-30^\circ$ . As a result it was found, that for the Apatity station values of ellipticity of polarization (ratio  $b/a$ ,  $b$  is a small,  $a$  is a large half-axes of the polarization ellipse) were 0.2 for  $E$  and 0.07 for  $H$ . With increasing the distance from the source  $b/a$  values were increased and consisted of 0.25 for  $E$  at the Voknavolok station, and 0.3 for  $E$  and  $H$  at the Vuoksa one. The results of measurements were compared with calculated data obtained using of developed software basing on the solution of the problem of the field determination generated by a cable in the plane "earth-ionosphere" waveguide taking into account displacement currents. As a result of calculations the ellipticity of polarization for  $E$  and  $H$  components coincides and is 0.026 at the Apatity, 0.22 at the Voknavolok and 0.32 at the Vuoksa stations. Without accounting of the influence of ionosphere calculated values of  $b/a$  for these stations are accordingly 0.0017, 0.052, 0.12. Calculations with the use of the problem solution for a cable over a half-space, when neglecting displacement currents, gave linear polarization of  $E$  and  $H$  fields ( $b/a = 0$ ).

The comparison of experimental and calculated data shows their good coincidence at the Vuoksa and Voknavolok stations and closes enough coincidence for  $H$  at the Apatity one. Distinctions of  $b/a$  values for  $E$  field at the Apatity station are caused by the influence of discontinuities of the medium beneath the observation point, which

appears in a greater degree for electric, and in a smaller degree for magnetic field. The obtained results of experimental and theoretical researches show increasing of the polarization ellipticity of ELF-station electrical and magnetic fields with increasing of the distance to an observation station from the source. Conterminous experimental and calculated  $E$  and  $H$  field values of  $b/a$  for the Vuoksa and Voknavolok stations indicate, that the polarization ellipticity depends first of all on features of the fields propagation in the "earth-ionosphere" waveguide at a great distance from the source and in a smaller degree on the influence of conductivity discontinuities of the medium under the receiving stations (the influence of such discontinuities appears, as the experience shows, in disturbance of orthogonality of  $E$  and  $H$  polarization ellipse axes because of the  $E$  field turning).

---

***Kostkin P.M., Morozova O.M., Saraev A.K. (1997) Software for calculations of electromagnetic field of the ELF radio station in the plane waveguide "Earth-Ionosphere"//“Actual problems in deep EM studies” Russian-German seminar, Moscow, March 11-15, 1997, page 31. /theses/***

Earth Crust Institute, State University, St. Petersburg,

The antenna system of the ELF radio station is represented by horizontally located in a latitude direction and grounded at the ends a line of electro-transmission about 60 km length. Operational mode - harmonic, range of operational frequencies - from the first tens up to the first hundreds hertz.

For the realization of electromagnetic field calculations the antenna system is approximated by grounded at the ends a finite length cable, located on the lower boundary of a plane waveguide - a layer between two half-spaces (the earth and the ionosphere). The full solution is obtained and programs for calculation of electromagnetic field components of a dipole and cable in view of resistivities, dielectric permittivities of all three layers (earth, air and ionosphere) and displacement currents are developed. The field of the cable is calculated by integration along the cable length of dipole field components. In the programs a numerical integration of complex expressions, containing oscillating Bessel functions is realized. A relative error of the calculations is  $10^{-9}$ .

The necessity of taking into account of the wave number in the air  $k_0$  is stipulated because of even for extremely low frequencies at very large distances  $r$  (hundreds-thousands kilometers) the contribution of terms in the full solution of a problem containing the multiplicands  $k_0 r$  is rather significant.

Features of integrated function are investigated at non-zero values  $k_0$ . Using fulfilled calculations, areas, in which it is possible to use approximating of the antenna system instead of a cable by a dipole, are determined. With distinction less than 10 % these areas are situated at distances more than 100 km on a direction across the cable and more than 150 km - along the cable (for frequency 80 Hz, resistivities of the earth and ionosphere accordingly  $10^4$  and  $10^5$  Ohm·m and altitude of the ionosphere 90 km).

---

***Сараев А. К., Косткин П. М. (1998) Структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. // Вопросы геофизики. Вып. 35. СПб.: Изд-во С-Петербургского ун-та, 1998. С. 117-135. — (Ученые записки СПбГУ; № 433)***

Институт земной коры Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург,  
[aks@AS1002.spb.edu](mailto:aks@AS1002.spb.edu)

Новым перспективным направлением глубинной электроразведки является использование в качестве источника электромагнитного поля сверхнизкочастотной (СНЧ) радиоустановки "Зевс". СНЧ-радиоустановка расположена на севере Кольского полуострова. Она состоит из генератора гармонически изменяющегося тока и горизонтально расположенной антенны длиной около 60 км, заземленной на концах и ориентированной в широтном направлении. Рабочие частоты могут меняться от десятков до сотен герц. Дальнодействие составляет около 10000 км. В обычном режиме СНЧ-радиоустановка работает на одной из частот указанного диапазона, которая может использоваться для электромагнитного профилирования или мониторинга сейсмической активности. Для исследований методом частотных зондирований необходима предварительная подготовка, включение источника на разных частотах по расписанию и проведение измерений в согласованные интервалы времени.

Данный источник может использоваться непосредственно для проведения электромагнитных зондирований и профилирования при решении геолого-геофизических задач. Его применение особенно актуально в тех случаях, когда необходима высокая точность измерений (мониторинг сейсмической активности [1], картирование слабоконтрастных по удельному электрическому сопротивлению массивов горных пород). В неблагоприятных условиях для методов, основанных на использовании естественных электромагнитных полей

(при значительном уровне промышленных помех, а также в высоких широтах при существенном влиянии ионосферных возмущений), измерения полей СНЧ-радиоустановки позволяют получать более надежные данные.

СНЧ-радиоустановка также может применяться при получении опорных данных для интерпретации результатов других методов, например метода аудиоманнитотеллурического зондирования [2], метода электромагнитного профилирования на промышленной частоте 50 Гц [3]. Уверенная интерпретация результатов этих методов возможна при допустимости аппроксимации исследуемого электромагнитного поля плоской вертикально падающей волной. В качестве критериев используются сопоставления получаемых результатов с данными измерений полей СНЧ-радиоустановки, выполненные при учете структуры полей источников и неоднородного строения среды.

Для эффективного применения СНЧ-радиоустановки при решении геолого-геофизических задач, прогнозировании землетрясений и для комплексирования с другими электроразведочными методами необходимо изучить закономерности изменения ее электромагнитного поля. При проведении расчетов и изучении структуры электромагнитного поля источник такого типа может быть аппроксимирован горизонтальным электрическим диполем. На относительно небольшом удалении от источника необходимо учитывать длину антенной системы и рассматривать поле кабеля конечной длины.

Структуры нормальных электромагнитных полей (над однородным изотропным полупространством) горизонтального электрического диполя и кабеля в квазистационарном приближении достаточно хорошо изучены [4]. Вместе с тем использовать полученные ранее результаты для объяснения особенностей изменения электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки не удастся. На больших расстояниях от данного источника структура поля существенно отличается от имеющихся представлений о полях в дальней зоне горизонтального электрического диполя [4 -7].

Ранее при анализе нормального поля горизонтального электрического диполя рассматривались результаты расчетов для полупространства в квазистационарном приближении по низкочастотным формулам без учета токов смещения в воздухе (полагалось, что волновое число воздуха  $k_0 = 0$ ). Такой подход к решению задачи был оправдан при использовании низкочастотных электроразведочных установок с относительно небольшим расстоянием от источника до точки наблюдения. СНЧ-радиоустановка является мощным источником, и ее поле может быть измерено на значительном удалении (сотни - тысячи километров). В этом случае расстояния до точек наблюдения превышают высоту ионосферы, и при анализе закономерностей изменения составляющих поля возникает необходимость учета ее влияния. Кроме того, при больших расстояниях от источника до точек наблюдения даже для сверхнизких частот (десять-сотни герц) следует ожидать увеличения влияния токов смещения в воздухе. Поэтому при проведении расчетов полей СНЧ-радиоустановки было использовано решение задачи о поле диполя, помещенного на нижнюю границу волновода земля - ионосфера, с учетом токов смещения в воздухе и электрических свойств земли и ионосферы.

#### **Выражения составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя в волноводе земля-ионосфера**

Расчетам сверхнизкочастотных электромагнитных полей посвящен ряд публикаций радиофизического профиля, нацеленных на решение задач распространения радиоволн и связи [8-14]. В настоящее время при исследовании закономерностей распространения радиоволн СНЧ-радиоустановки рассматривается сферическая модель волновода, и учитываются особенности строения ионосферы (задается профиль изменения с высотой электронной концентрации и, соответственно, свойств ионосферы), а также сезонные и суточные изменения ее параметров. Вместе с тем в этих работах принята дипольная аппроксимация источника, и вычисления полей производятся по асимптотическим формулам, пригодным для использования на некотором, достаточно неопределенном расстоянии от источника.

При решении геолого-геофизических задач в различных районах, в том числе и на Кольском п-ове в непосредственной близости от СНЧ-радиоустановки, необходимо проведение расчетов, как для дальней, так и для ближней зон рассматриваемого источника с учетом его реальных параметров. С другой стороны, в указанных выше работах наиболее детально анализировались составляющие поля, представляющие интерес с точки зрения решения задач связи, в первую очередь вертикальная составляющая электрического поля  $E_z$ . Она характеризуется минимальным затуханием при распространении в волноводе земля-ионосфера, однако, являясь менее зависимой от параметров земли и ионосферы, она менее информативна. Более информативными могут быть другие составляющие электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, и необходимо детально изучить закономерности их изменения в зависимости от свойств и структурных особенностей земли.

При расчетах составляющих электромагнитного поля диполя и кабеля конечной длины в волноводе земля-ионосфера использовались результаты исследований П.М. Косткина и О.М. Морозовой, выполненных ранее для решения задач радиоволнового просвечивания (РВП). Были получены строгие решения волнового уравнения в трехслойной среде с учетом токов смещения и электромагнитных параметров каждого слоя (удельного электрического сопротивления, диэлектрической и магнитной проницаемостей), разработаны программные средства для вычисления составляющих поля электрического и магнитного диполей, как ортогональных, так и параллельных границам раздела сред. При этом источник и приемник могут находиться в любой из трех сред. Использование полученных решений и разработанных программных средств для анализа

закономерностей изменения полей в методе РВП рассмотрено в работе [15], а для анализа структуры электромагнитного поля вертикального электрического диполя в волноводе земля-ионосфера - в работе [16].

При анализе структуры электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки нами был принят подход, основанный на использовании модели ионосферы в виде полупространства и строгом решении задачи без упрощающих допущений о параметрах источника и свойствах среды. Принятая модель ионосферы для частот  $\sim 1 - 10^5$  Гц характеризуется значениями эффективной высоты волновода 90 км в ночное время и 60 км в дневное [8]. Эффективное значение удельного электрического сопротивления ионосферы принято равным  $10^5$  Ом-м. Эта модель ионосферы при фиксированной частоте излучения адекватно характеризует структуру электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, модель позволяет получить представления о характере изменения составляющих поля и объяснить результаты экспериментов, как в непосредственной близости, так и на удалении от источника. Анализ данных из [8] показывает, что модель плоского волновода применима для рассматриваемых условий примерно до расстояния 3000 км от источника. Для вычисления уровней полей СНЧ-радиоустановки в точке измерений с учетом сезонных и суточных изменений параметров ионосферы необходимо использовать более сложную, с изменяющимися свойствами модель ионосферы, что реализовано в работах радиофизического профиля.

Настоящая статья является первой из планируемого авторами ряда публикаций, в которых будут подробно рассмотрены особенности структуры электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки применительно к решению геолого-геофизических задач и прогноза землетрясений. По этой причине в статье приводятся полные выражения для составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя, используемые в разработанных программах для расчетов полей диполя и кабеля конечной длины в волноводе земля-ионосфера, а также достаточно детально рассмотрена методика численных расчетов.

Для вычисления составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки горизонтальный электрический диполь, находящийся внутри среднего слоя трехслойной среды, необходимо было поместить на нижнюю границу слоя. В этом случае в полученных ранее выражениях для некоторых составляющих поля появлялись расходящиеся интегралы. Путем преобразований эти расходимости удалось убрать, и окончательные выражения содержат только сходящиеся интегралы.

Модель, использованная при расчетах электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, показана на рис. 1. В этой модели однородный пласт (воздух) мощностью  $d$  находится между двумя однородными полупространствами — землей и ионосферой. Горизонтальный электрический диполь расположен в начале цилиндрической  $(r, \varphi, z)$  и прямоугольной  $(x, y, z)$  систем координат на нижней границе волновода земля - ионосфера и ориентирован по оси  $x$ . В каждой из трех сред, воздухе - "0", земле - "1" и ионосфере - "2", задаются удельные электрические сопротивления ( $\rho$ ) и относительные диэлектрические проницаемости ( $\epsilon$ ), а относительные магнитные проницаемости ( $\mu$ ) приняты равными единице для всех трех сред. Закон изменения электромагнитного поля во времени принят в виде  $e^{i\omega t}$ .

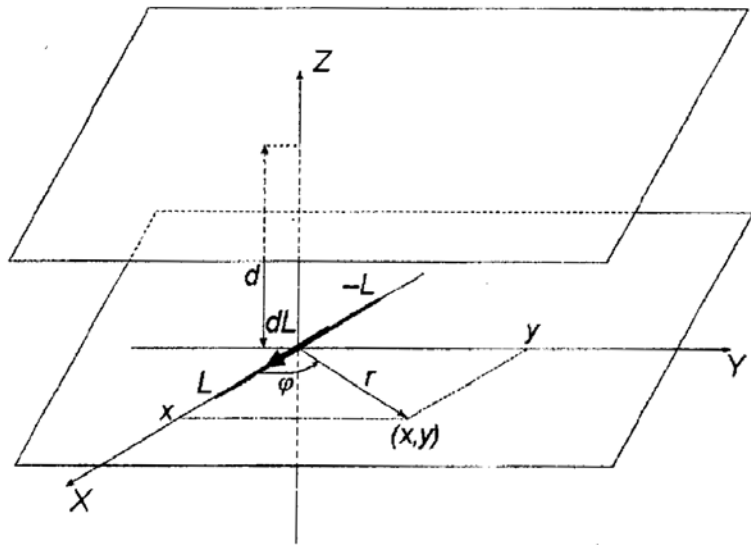


Рис. 1. Модель, использованная при расчетах электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки

Выражения составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя для среды "0" в цилиндрической системе координат таковы:

составляющие поля над полупространством (нормального поля)

$$H_{\text{норм}} = 2\beta \sin \varphi (k_0^2 - k_1^2) \left\{ \int_0^{\infty} B_2 J_0(\lambda r) d\lambda - \frac{1}{2r} \int_0^{\infty} B_1 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right\},$$

$$H_{\varphi \text{норм}} = 2\beta \cos \varphi (k_0^2 - k_1^2) \left\{ \frac{k_0^2 k_1^2}{k_0^2 + k_1^2} \int_0^{\infty} B_1 J_0(\lambda r) d\lambda + \frac{1}{r} \int_0^{\infty} B_1 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right\},$$

$$H_{z \text{норм}} = 2\beta \sin \varphi \frac{1}{(k_0^2 - k_1^2)r} (P_1 - P_0),$$

$$\begin{aligned}
E_{r\text{норм}} &= 2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2 + k_1^2} \left\{ 2M_0 + (k_0^2 - k_1^2) \left[ k_1^2 \int_0^\infty n_0 B_1 J_0(\lambda r) d\lambda + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{k_0^2}{r} \int_0^\infty \frac{\lambda}{n_0} B_1 J_1(\lambda r) d\lambda \right] \right\}, \\
E_{\varphi\text{норм}} &= 2\beta \sin \varphi \frac{i\omega}{k_0^2 + k_1^2} \left\{ -\frac{k_1^2}{k_0^2 - k_1^2} M_0 + \frac{k_0^2 + k_1^2}{k_0^2 - k_1^2} M_1 + \right. \\
&\quad \left. + \frac{k_0^2(k_0^2 - k_1^2)}{r} \int_0^\infty \frac{\lambda}{n_0} B_1 J_1(\lambda r) d\lambda \right\}, \\
E_{z\text{норм}} &= -2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2 + k_1^2} k_1^2 (k_0^2 - k_1^2) \int_0^\infty B_1 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda,
\end{aligned} \tag{1}$$

здесь  $\beta = \mu_0 I d L / (4\pi)$  - момент диполя,  $I$  — сила тока,  $dL$  — длина диполя; волновое число  $k_j$  в средах  $j = 0; 1$  определяется выражением  $k_j^2 = \mu_0 \omega (i\sigma_j - \varepsilon_0 \varepsilon \omega)$ , где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $\sigma_j$  — удельная электропроводность ( $\sigma_j = 1/\rho_j$ ),  $\varepsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)$  Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная проницаемость вакуума,  $J_\nu$  — функции Бесселя первого рода порядка  $\nu$ .

$$\begin{aligned}
B_1 &= \frac{\lambda}{(n_0 + n_1)(n_0 k_1^2 + n_1 k_0^2)}, \quad B_2 = \frac{\lambda}{(n_0 + n_1)^2}, \\
M_j &= \frac{k_j r + 1}{r^3} e^{-k_j r}, \quad P_j = \frac{k_j^2 r^2 + 3k_j r + 3}{r^3} e^{-k_j r}, \\
\cos \varphi &= \frac{x}{r}, \quad \sin \varphi = \frac{y}{r}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad n_0 = \sqrt{\lambda^2 + k_0^2}, \quad n_1 = \sqrt{\lambda^2 + k_1^2};
\end{aligned}$$

составляющие поля в волноводе земля – ионосфера

$$\begin{aligned}
H_r &= H_{r\text{норм}} + \beta \sin \varphi \left\{ 4(k_0^2 - k_1^2) \int_0^\infty n_1 B_7 J_0(\lambda r) d\lambda - \frac{2(k_0^2 - k_1^2)}{r} \left[ \int_0^\infty B_6 J_1(\lambda r) d\lambda + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \int_0^\infty B_3 J_1(\lambda r) d\lambda + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \right] + \frac{8k_1^2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \int_0^\infty B_5 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda \right\}, \\
H_\varphi &= H_{\varphi\text{норм}} - \beta \cos \varphi \left\{ 2(k_0^2 - k_1^2) \left[ \int_0^\infty B_6 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda + \int_0^\infty B_3 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \right] - 4(k_0^2 - k_2^2) \left[ \int_0^\infty n_1 B_7 J_0(\lambda r) d\lambda + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + 2k_1^2 \int_0^\infty B_5 J_0(\lambda r) \lambda^3 d\lambda \right] - \frac{2(k_0^2 - k_1^2)}{r} \left[ \int_0^\infty B_6 J_1(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty B_3 J_1(\lambda r) d\lambda + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \right] + \frac{8k_1^2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \int_0^\infty B_5 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda \right\}, \\
H_z &= H_{z\text{норм}} + 4\beta \sin \varphi (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda, \\
E_r &= E_{r\text{норм}} + 2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2} \left\{ \frac{k_0^2 - k_1^2}{r} \left[ \int_0^\infty n_0 B_3 J_1(\lambda r) d\lambda - \int_0^\infty n_0 B_6 J_1(\lambda r) d\lambda + \right. \right.
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& + 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty n_0 B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \left] - 2(k_0^2 - k_2^2) \left[ 2k_0^2 \int_0^\infty n_1 B_5 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda + \right. \right. \\
& + \left. \int_0^\infty n_0^2 B_7 J_0(\lambda r) d\lambda \right] + (k_0^2 - k_1^2) \left[ \int_0^\infty n_0 B_6 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda - \int_0^\infty n_0 B_3 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda - \right. \\
& - \left. (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty n_0 B_4 J_0(\lambda r) \lambda d\lambda \right] + \\
& + \left. \frac{2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \left[ 2k_0^2 \int_0^\infty n_1 B_5 J_1(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right] \right\}, \\
E_\varphi & = E_{\varphi \text{норм}} + 2\beta \sin \varphi \frac{i\omega}{k_0^2} \left\{ 2k_0^2 (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_7 J_0(\lambda r) d\lambda - \right. \\
& - \frac{k_0^2 - k_1^2}{r} \left[ \int_0^\infty n_0 B_6 J_1(\lambda r) d\lambda - \int_0^\infty n_0 B_3 J_1(\lambda r) d\lambda - 2(k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty n_0 B_4 J_1(\lambda r) d\lambda \right] + \\
& + \left. \frac{2(k_0^2 - k_2^2)}{r} \left[ 2k_0^2 \int_0^\infty n_1 B_5 J_1(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right] \right\}, \\
E_z & = E_{z \text{норм}} + 2\beta \cos \varphi \frac{i\omega}{k_0^2} \left\{ (k_0^2 - k_1^2) \left[ \int_0^\infty B_6 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda + \int_0^\infty B_3 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda + \right. \right. \\
& + \left. (k_0^2 - k_2^2) \int_0^\infty B_4 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda \right] - 2(k_0^2 - k_2^2) \left[ 2k_1^2 \int_0^\infty B_5 J_1(\lambda r) \lambda^2 d\lambda + \right. \\
& + \left. \left. \int_0^\infty n_1 B_7 J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \right] \right\};
\end{aligned} \tag{2}$$

Входящие в (2) коэффициенты определяются формулами:

$$\begin{aligned}
B_3 & = \frac{n_0 k_1^2 - n_1 k_0^2}{n_0 k_1^2 + n_1 k_0^2} \frac{n_0 k_2^2 - n_2 k_0^2}{n_0 + n_1} \frac{\lambda^2}{C} e^{-n_0 d}, \quad B_4 = \frac{n_0 \lambda^2}{(n_0 + n_1)(n_0 + n_2)} \frac{n_0 k_2^2 + n_2 k_0^2}{CD}, \\
B_5 & = \frac{n_0^2 \lambda^2}{CD}, \quad B_6 = \frac{n_0 k_2^2 - n_2 k_0^2}{CD} \lambda^2 A e^{-n_0 d}, \quad B_7 = \frac{n_0}{(n_0 + n_1)(n_0 + n_2)} \frac{\lambda}{D} e^{-n_0 d}, \\
n_2 & = \sqrt{\lambda^2 + k_2^2}, \quad k_2^2 = \mu_0 \omega (\sigma_2 i - \varepsilon_0 \varepsilon_2 \omega), \quad A = (n_0 + n_2) e^{n_0 d} + (n_0 - n_2) e^{-n_0 d}, \\
C & = (n_0 k_1^2 + n_1 k_0^2) (n_0 k_2^2 + n_2 k_0^2) e^{n_0 d} - (n_0 k_1^2 - n_1 k_0^2) (n_0 k_2^2 - n_2 k_0^2) e^{-n_0 d}, \\
D & = (n_0 + n_1) (n_0 + n_2) e^{n_0 d} - (n_0 - n_1) (n_0 - n_2) e^{-n_0 d}.
\end{aligned}$$

Анализ приведенных выражений для составляющих электромагнитного поля горизонтального электрического диполя показывает, что волновое число воздуха  $k_0$  входит в некоторые члены этих выражений в виде слагаемых в первой или второй степени совместно с волновыми числами земли  $k_1$  или ионосферы  $k_2$ , а также в виде множителя во внеинтегральные члены. Вкладом значений  $k_0$ , как слагаемых в рассматриваемых ситуациях можно пренебречь. При учете вклада значений  $k_0$ , входящих в выражения для составляющих поля в виде множителя, необходимо рассматривать величину  $k_0 r$ , которой можно пренебречь только при малых расстояниях и надо учитывать при больших расстояниях от источника. Даже для сверхнизких частот (десятки — сотни герц) при очень больших расстояниях  $r$  (сотни - тысячи километров) вклад членов, содержащих множителя  $k_0 r$ , должен быть весьма заметным. Аналогичные особенности отмечены ранее в работе [17] при рассмотрении поля вертикального магнитного диполя.

Расчетные формулы для составляющих электромагнитного поля кабеля конечной длины получены интегрированием по длине кабеля  $2L$  (см. рис. 1) выражений для составляющих поля диполя. При этом составляющие поля диполя первоначально преобразовывались в прямоугольную систему координат. В

разработанной программе предусмотрено вычисление модулей и фаз составляющих  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ , полуосей  $a$  и  $b$  эллипсов поляризации электрического и магнитного полей и углов, характеризующих их ориентацию.

### Особенности численных расчетов

Для вычисления интегралов, входящих в выражения составляющих поля (1) и (2), промежутки интегрирования  $[0, \infty)$  разбиваются на конечные промежутки, расположенные между соседними нулями функций Бесселя. Интегрирование на каждом промежутке проводится методом Гаусса по прямой квадратуре для  $n$  точек и уточняющей квадратуре для  $2n+1$  точек [18]. Для этого вычисляются интегральные суммы

$$S_n^{(j)} = \sum_{i=1}^n f_j(x_i^{(n)}) W_i^{(n)}, \quad S_{2n+1}^{(j)} = \sum_{i=1}^{2n+1} f_j(x_i^{(2n+1)}) W_i^{(2n+1)}, \quad (3)$$

где  $S_n^{(j)}$  — интегральная сумма на конечном промежутке для  $j$ -го интеграла, вычисленная по прямой квадратуре,  $S_{2n+1}^{(j)}$  — интегральная сумма на этом же промежутке для  $j$ -го интеграла, вычисленная по уточняющей квадратуре,  $W_i^{(n)}, W_i^{(2n+1)}$  — веса метода Гаусса для прямой и уточняющей квадратур соответственно,  $f_j(x_i)$  — значения  $j$ -й подынтегральной функции, вычисленной в  $i$ -м узле, который зависит от используемого метода интегрирования. После этого оценивается точность вычисления интеграла с помощью соотношений

$$\frac{|\operatorname{Re} S_{2n+1}^{(j)} - \operatorname{Re} S_n^{(j)}|}{|\operatorname{Re} S_{2n+1}^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad \frac{|\operatorname{Im} S_{2n+1}^{(j)} - \operatorname{Im} S_n^{(j)}|}{|\operatorname{Im} S_{2n+1}^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad \frac{|S_{2n+1}^{(j)} - S_n^{(j)}|}{|S_{2n+1}^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1$  — погрешность вычисления интегралов на промежутке  $[0, \infty)$ . Если соотношения (4) выполняются одновременно, то за значение  $j$ -го интеграла на данном промежутке интегрирования принимается величина  $S_{2n+1}^{(j)}$ . Если соотношения (4) одновременно не выполняются, то промежуток интегрирования делится пополам и процедура вычисления повторяется на каждом из новых промежутков. Процедура заканчивается, если на каждом промежутке для каждого интеграла выполняются соотношения (4). При этом если для какого-либо интеграла соотношения (4) на каком-то этапе вычислений выполняются, то при дальнейших дроблениях промежутка интегрирования он уже не вычисляется.

Оценка остатка интегрирования  $R_k^{(j)}$  на промежутке  $[0, \infty)$  проводится по двум схемам.

В первой схеме критерием окончания интегрирования служит соотношение

$$R_k^{(j)} = \frac{S_\varepsilon^{(j)}}{|S_k^{(j)}|} < \varepsilon_1, \quad (5)$$

где  $S_\varepsilon^{(j)}$  — сумма модулей последних пяти частичных интегралов,  $S_k^{(j)}$  — сумма частичных интегралов, вычисленных между  $k$  корнями соответствующих функций Бесселя. Если (5) выполняется, то за значение  $j$ -го интеграла на промежутке  $[0, \infty)$  принимается величина  $S_k^{(j)}$ .

Во второй схеме используется метод Лонгмана [19, 20], применяющийся для вычисления интегралов от медленно сходящихся осциллирующих функций. Для оценки остатка интегрирования на промежутке  $[0, \infty)$  используется соотношение [21]

$$R_k^{(j)} < \frac{\Delta_j^p}{2^{p+1}} < \varepsilon_1, \quad (6)$$

где  $\Delta_j^p$  —  $p$ -я разность, построенная из  $p+1$  частичных интегралов, вычисленных между  $p+1$  корнями функций Бесселя. Если условие (6) для  $j$ -го интеграла выполняется, то, в соответствии со схемой Лонгмана, за значение  $j$ -го интеграла на промежутке  $[0, \infty)$  принимается величина

$$S_L^{(j)} = S_k^{(j)} + \sum_{m=k+1}^p \frac{\Delta_j^p}{2^{p+1}},$$

где  $k+1$  — номер корня соответствующей функции Бесселя, начиная с которого вычисления производятся по схеме метода Лонгмана. Задаваемая относительная погрешность вычисления компонент поля ( $\varepsilon$ ) равна  $10^{-9}$ , а относительная погрешность вычисления интегралов ( $\varepsilon_1$ ) принимается равной  $0,1\varepsilon$ .

При разработке программы было опробовано различное количество узлов интегрирования для метода Гаусса: 5 (11), 11 (23), 23 (47), 40 (81) (в скобках указано количество узлов, используемых для уточняющей квадратуры). Изменение количества узлов интегрирования после 11 (23) не приводило к изменениям в

вычисленных значениях интегралов и компонент поля в пределах задаваемой относительной погрешности  $\varepsilon$ , поэтому это количество узлов было принято в качестве основного варианта вычислений. Вместе с тем в программе предусмотрена возможность изменения при необходимости этих параметров вычислений.

### Анализ результатов расчетов

Расчеты составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки выполнены для следующих параметров:  $f = 80$  Гц, длина кабеля  $2L = 60$  км, сила тока 200 А, высота ионосферы  $d = 90$  км, удельные сопротивления земли, воздуха и ионосферы соответственно  $\rho_1 = 10^4$ ,  $\rho_0 = 10^{13}$ ,  $\rho_2 = 10^5$  Ом·м. Разработанные программные средства позволяют варьировать значения относительных диэлектрических проницаемостей во всех трех средах, однако при расчетах они были приняты равными единице (вклад значений  $\varepsilon$  в волновые числа  $k_1$  и  $k_2$  незначителен, а для воздуха  $\varepsilon = 1$ ). В отдельных случаях использованы другие параметры, и это оговаривается в тексте.

На рис. 2 приведены результаты расчетов составляющих электрического поля  $E_x$  по профилям, ориентированным различным образом относительно источника. Два профиля направлены перпендикулярно кабелю. Один из них проходит через центр ( $x/L = 0$ ), другой смещен в сторону от центра кабеля ( $x/L = 10$ ). Третий профиль ориентирован вдоль кабеля ( $y/L = 0$ ). Рассматриваются зависимости изменения  $E_x$  от расстояния до источника, выраженного в единицах  $L$ . Как видно из рисунка, на относительно небольших расстояниях кривые (3), полученные по результатам расчетов с использованием модели полупространства без учета влияния ионосферы и токов смещения в воздухе (далее будем называть их квазистационарными полями), совпадают с кривыми, рассчитанными с учетом влияния токов смещения (2), а также с учетом токов смещения и ионосферы (1). Поэтому на относительно небольшом расстоянии структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки может быть охарактеризована результатами расчетов в квазистационарном приближении. При удалении от источника для расчетов составляющих поля необходимо использовать решение задачи с учетом влияния ионосферы и токов смещения в воздухе (будем называть их полями в волноводе).

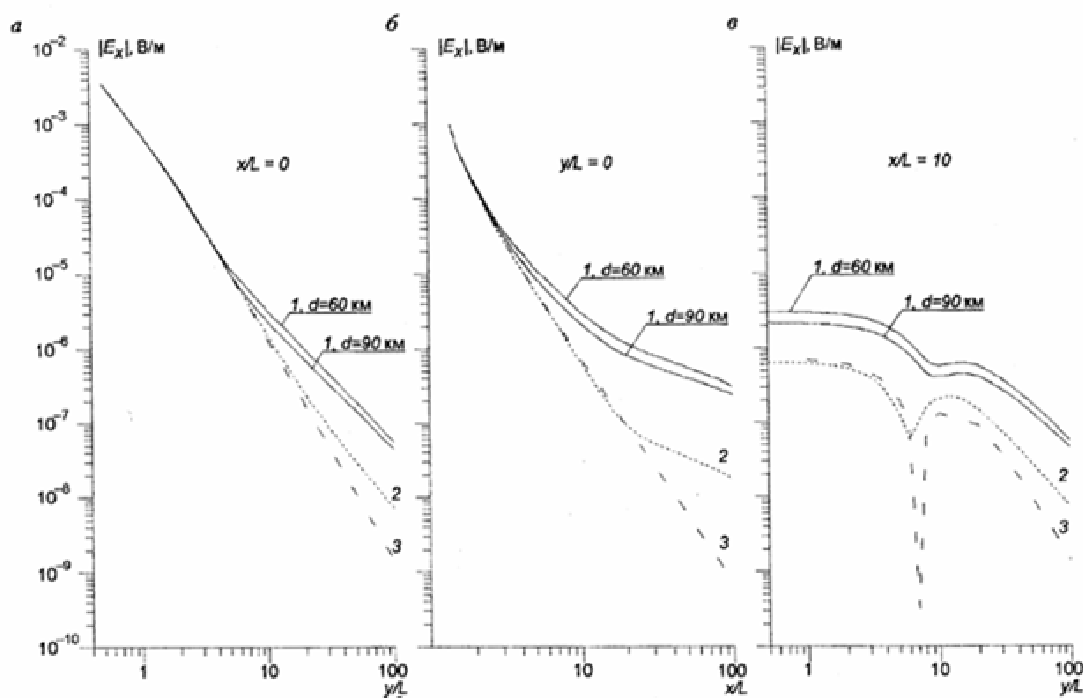


Рис. 2. Зависимости  $|E_x|$  от расстояния до источника по профилям  $x/L = 0$  (а),  $y/L = 0$  (б) и  $x/L = 10$  (в). 1 – поле в волноводе, 2 – расчеты без учета влияния ионосферы, 3 – квазистационарное поле,  $d$  – высота волновода.

Анализ приведенных на рис. 2 кривых показывает, что для принятых параметров модели и источника учет токов смещения в воздухе при расчетах составляющей  $E_x$  необходим начиная с расстояний 300 км в экваториальной зоне и 600 км вдоль кабеля, а влияние ионосферы следует учитывать, начиная с расстояния 100 км вдоль кабеля и 200 км в экваториальной зоне кабеля. Здесь и далее оценки приведены для 10 % отличий соответствующих значений составляющих поля.

Сопоставление результатов расчетов полей в волноводе для кабеля и диполя позволило установить, что, начиная с расстояний более 100 км по оси  $y$  и более 150 км по оси  $x$ , может использоваться аппроксимация

антенной системы вместо кабеля диполем. Далее, рассматривая структуру поля СНЧ-радиоустановки, будем говорить о поле кабеля, так как расстояния для удобства анализа выражены в единицах полудлины кабеля  $L$ .

Влияние токов смещения в воздухе и ионосферы приводит также к изменению характера графика составляющей  $E_x$  по профилю  $x/L = 10$ . При этом суммарное влияние указанных факторов приводит к смещению зоны минимальных значений  $E_x$ , по сравнению со случаем квазистационарного поля, в сторону более высоких величин  $y/L$ , что соответствует приближению этой области к экваториальной зоне кабеля. Кроме того, для поля в волноводе характерны сглаженные значения  $E_x$  в области минимума.

Как следует из рис. 2, уменьшение высоты ионосферы до 60 км приводит к увеличению амплитуды составляющей  $E_x$  примерно на 80 % по отношению к амплитуде сигнала при  $d = 90$  км. Качественно это объясняется усилением волноводного эффекта при уменьшении высоты волновода.

При учете токов смещения и ионосферы существенным образом меняется диаграмма направленности данного источника. Для случая квазистационарного поля составляющие  $E_x$  на большом удалении в экваториальной зоне кабеля в два раза превосходят соответствующие значения на оси источника [4-7]. Наоборот, поле  $E_x$  в волноводе, как следует из рис. 2, начиная с расстояния 600 км по направлению вдоль кабеля превышает соответствующие значения в экваториальной зоне (примерно, в пять раз на расстоянии 3000 км). Эти особенности диаграммы направленности СНЧ-радиоустановки подтверждаются данными экспериментов.

Приведенные материалы показывают, что существующие представления о структуре поля горизонтального электрического диполя или кабеля конечной длины, основанные на использовании квазистационарного приближения и решения задачи без учета токов смещения в воздухе и влияния ионосферы, требуют корректировки при проведении измерений на больших расстояниях от источников такого типа.

Характер изменения диаграммы направленности с удалением от рассматриваемого источника для составляющей  $E_x$  иллюстрируется рис. 3. В данном случае под диаграммой направленности понимается график значений  $E_x$  по планшету на определенном расстоянии от источника. Диаграмма направленности для квазистационарного поля и расстояния  $10L$  приведена на рис. 3, а.

Отношение амплитуд поля по направлениям вдоль и вкрест кабеля здесь равно 0,5. Для поля в волноводе на этом же расстоянии диаграмма направленности принимает вид, показанный на рис. 3, б, и отношение амплитуд поля становится равным 0,9. Существенно диаграмма направленности меняется на большом удалении от источника  $100L$  (рис. 3, в). При этом отношение амплитуд поля вдоль и вкрест кабеля равно 5,4.

Особенности изменения составляющей поля  $H_y$ , включая оценки расстояний, начиная с которых необходим учет влияния токов смещения в воздухе и ионосферы, аналогичны рассмотренным выше закономерностям, установленным для составляющей  $E_x$ .

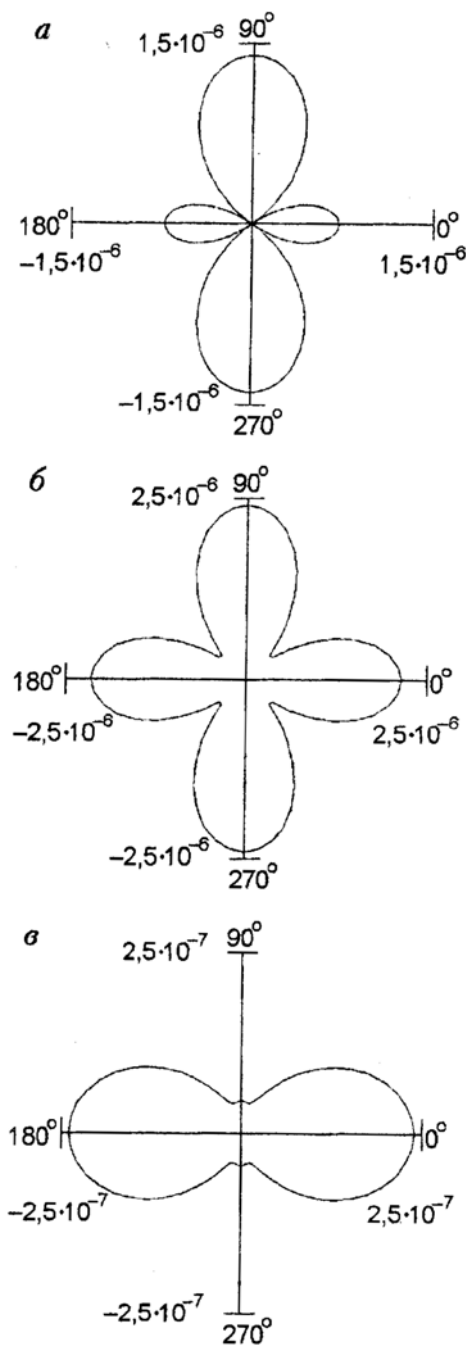


Рис. 3. Диаграммы направленности СНЧ-радиоустановки для  $|E_x|$ . а, б - удаление от источника  $10L$  (а - квазистационарное поле, б - поле в волноводе); в - удаление от источника  $100L$ , поле в волноводе;  $|E_x|$  выражено в В/м.

Проанализируем характер изменения других составляющих поля СНЧ-радиоустановки (рис. 4). Составляющие  $E_y$  и  $H_x$  вдоль осей  $x$  и  $y$  принимают нулевые значения, поэтому рассмотрим закономерности их изменения вдоль профиля  $r/L$ , ориентированного под углом  $45^\circ$  к направлению кабеля. На относительно небольших расстояниях от источника составляющие полей  $E_y$  (рис. 4, а) и  $H_x$  (рис. 4, б) в волноводе совпадают с составляющими квазистационарного поля, а при удалении от источника необходимо учитывать влияние ионосферы и токов смещения в воздухе. По рассматриваемому профилю учет токов смещения в воздухе для этих составляющих необходим начиная с расстояния 600 км, а влияние ионосферы - с расстояния 200 км.

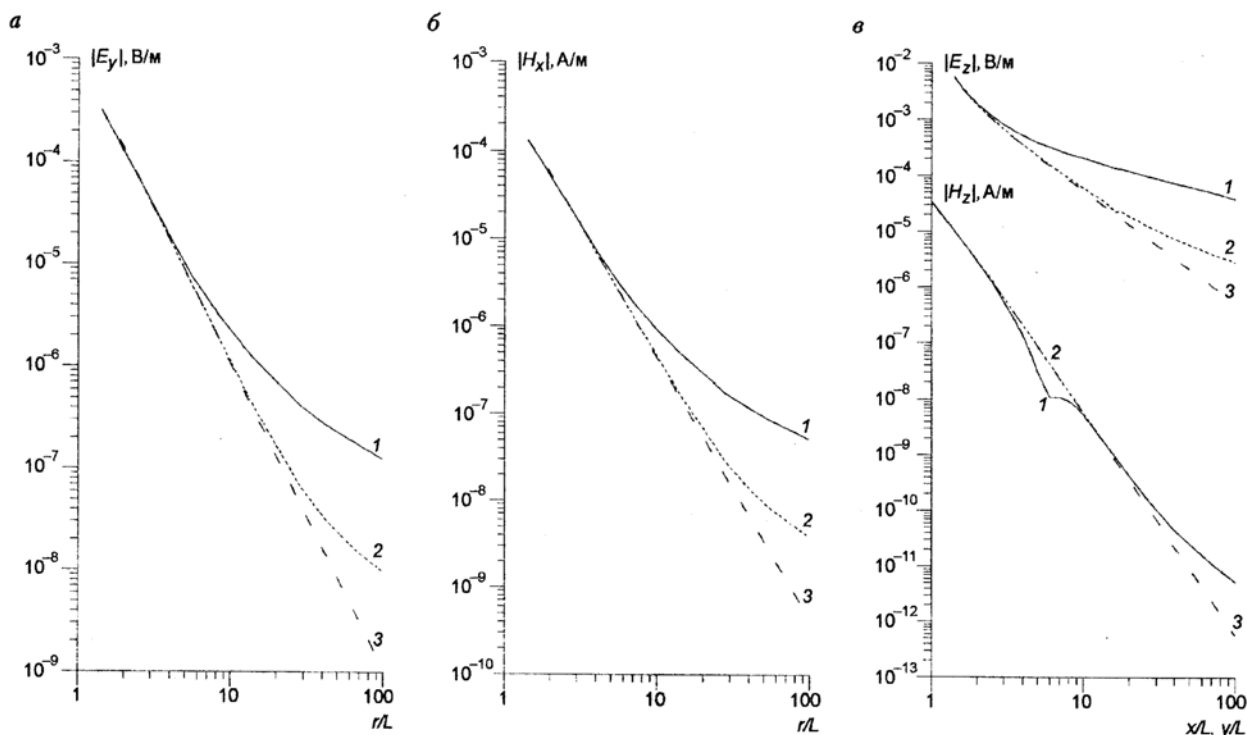


Рис. 4. Графики изменения модулей  $|E_{y,z}|$  (а),  $|H_{x,z}|$  (б) для профиля, ориентированного под углом  $45^\circ$  к оси  $x$ ,  $|E_x|$  по профилю  $y/L = 0$  (в) и  $|H_z|$  по профилю  $x/L = 0$  (в). Обозначения см. на рис. 2.

Составляющая поля  $E_z$  принимает нулевые значения в экваториальной зоне кабеля, поэтому проанализируем закономерности ее изменения вдоль кабеля по оси  $x$  (рис. 4, в). Учет токов смещения в воздухе в этом случае необходим начиная с расстояния 600 км, а влияния ионосферы - с расстояния 100 км.

Составляющая поля  $H_z$  принимает нулевые значения по направлению вдоль кабеля. Рассмотрим характер ее изменения в экваториальной зоне по оси  $y$  (рис. 4, в). Анализ поведения  $H_z$  показывает, что данная составляющая в наименьшей степени подвержена влиянию рассматриваемых факторов - токов смещения в воздухе и ионосферы. При этом влияние ионосферы и интервале изменения  $y$  от 100 до 300 км проявляется в уменьшении  $H_z$ . Минимум на графике  $|H_z|$ , составляющий 0,25 от значения квазистационарного поля, отмечается на расстоянии 200 км от источника. Начиная с расстояния 600 км значения  $H_z$  в волноводе превосходят соответствующие значения квазистационарного поля. При этом основной вклад в увеличение амплитуды  $H_z$  вносят токи смещения в воздухе, а ионосфера практически не влияет на поведение этой составляющей поля.

Следует отметить, что составляющая  $H_x$  характеризуется наиболее быстрым убыванием амплитуды с удалением от источника. На расстоянии 3000 км ( $100L$ ) ее амплитуда уменьшается на семь порядков по отношению к уровню поля на расстоянии 30 км ( $L$ ) от источника, тогда как для других составляющих поля это уменьшение составляет четыре-пять порядков. Наиболее медленно убывает вертикальная составляющая электрического поля  $E_z$ , для которой амплитуда при изменении расстояния от 30 до 3000 км уменьшается только на три порядка.

Наглядно структура поля СНЧ-радиоустановки иллюстрируется изолиниями составляющих, рассчитанных с достаточной детальностью по планшету, в центре которого находится данный источник. Рассмотрим характер изолиний составляющих квазистационарного электромагнитного поля кабеля вблизи источника (рис. 5) и поля в волноводе на удалении от источника (рис. 6). Анализ выполним для первой

четверти планшета, причем его размеры при рассмотрении нормального поля составляют  $6L \times 6L$ , а поля в волноводе -  $100L \times 100L$ . На приведенных рисунках кабель расположен по оси  $x$  и полудлине кабеля  $L$  соответствует расстояние по этой оси от 0 до 1. Изолинии  $E$  оцифрованы в В/м,  $H$  - в А/м. При этом использован логарифмический масштаб нанесения изолиний с шагом 1 в пределах каждого порядка.

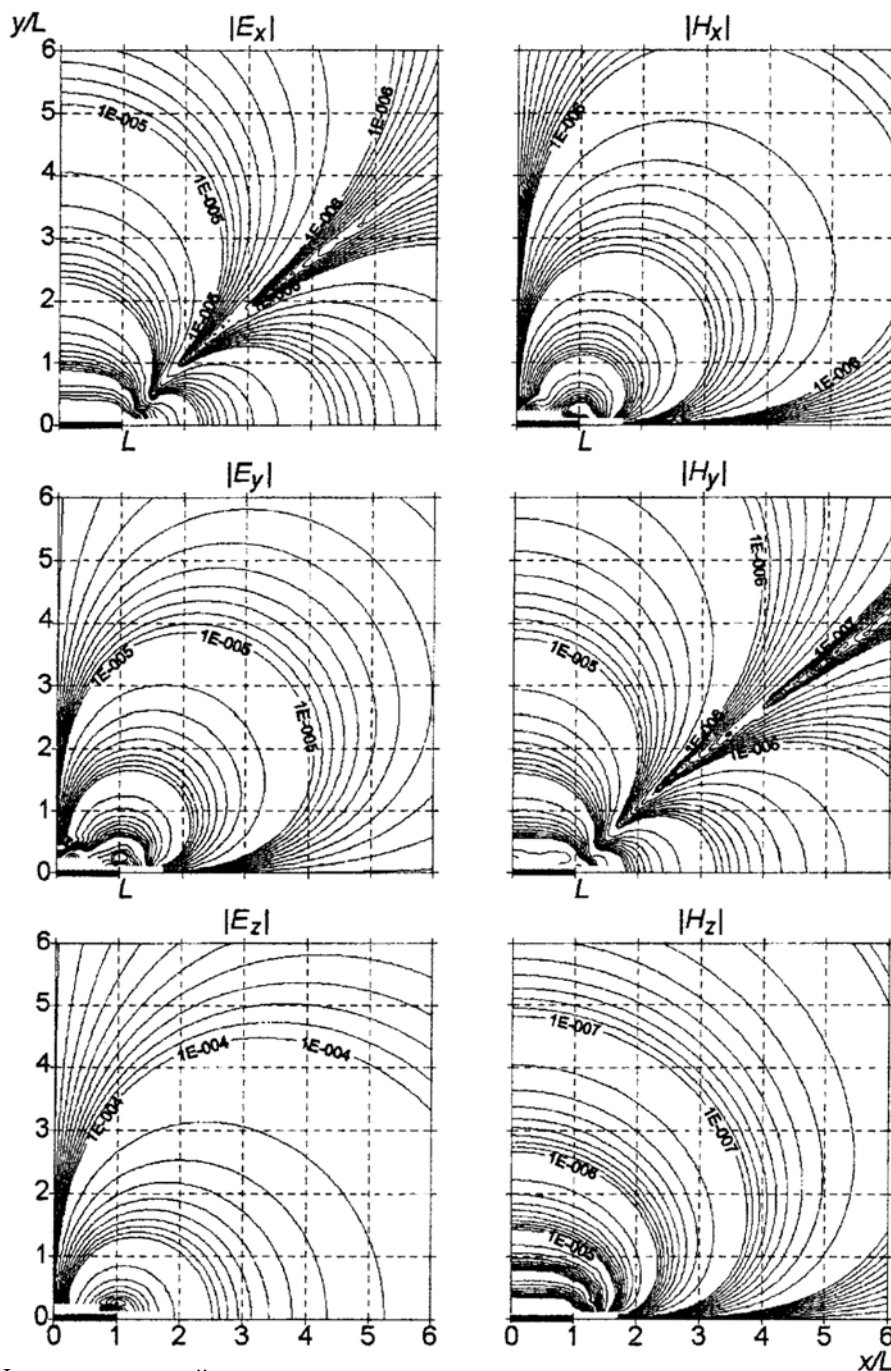


Рис. 5. Изолинии модулей составляющих электромагнитного поля на малых расстояниях от источника (квазистационарное поле).

Составляющие нормальных полей  $E_x$  и  $H_y$  по направлениям вдоль осей  $x$  и  $y$  имеют плавный закономерный характер изменения (рис. 5). Зоны минимальных значений полей с резкими градиентами ориентированы под углами около  $40^\circ$  относительно оси  $x$ . Значения  $E_x$  и  $H_y$  в экваториальной зоне превосходят соответствующие значения на оси кабеля. Для полей  $E_x$  и  $H_y$  в волноводе (рис. 6) зона минимальных значений выражена менее контрастно. Ее положение, как отмечалось выше при анализе рис. 2, в, смещается к оси  $y$  и примерно соответствует углу  $60 - 70^\circ$  относительно оси  $x$ . При этом значения  $E_x$  и  $H_y$  по направлению вдоль кабеля превосходят соответствующие значения в экваториальной зоне кабеля.

Составляющие квазистационарных полей  $E_y$  и  $H_y$  по направлениям вдоль осей  $x$  и  $y$  равны нулю. Форма изолиний составляющих квазистационарного поля в первом квадранте близка к окружностям (рис. 5). Для полей  $E_y$  и  $H_x$  в волноводе (рис. 6) изолинии вытягиваются вдоль направления, ориентированного под углом  $45^\circ$  к оси  $x$ , а их значения вдоль осей  $x$  и  $y$ , как и в случае нормальных полей, равны нулю.

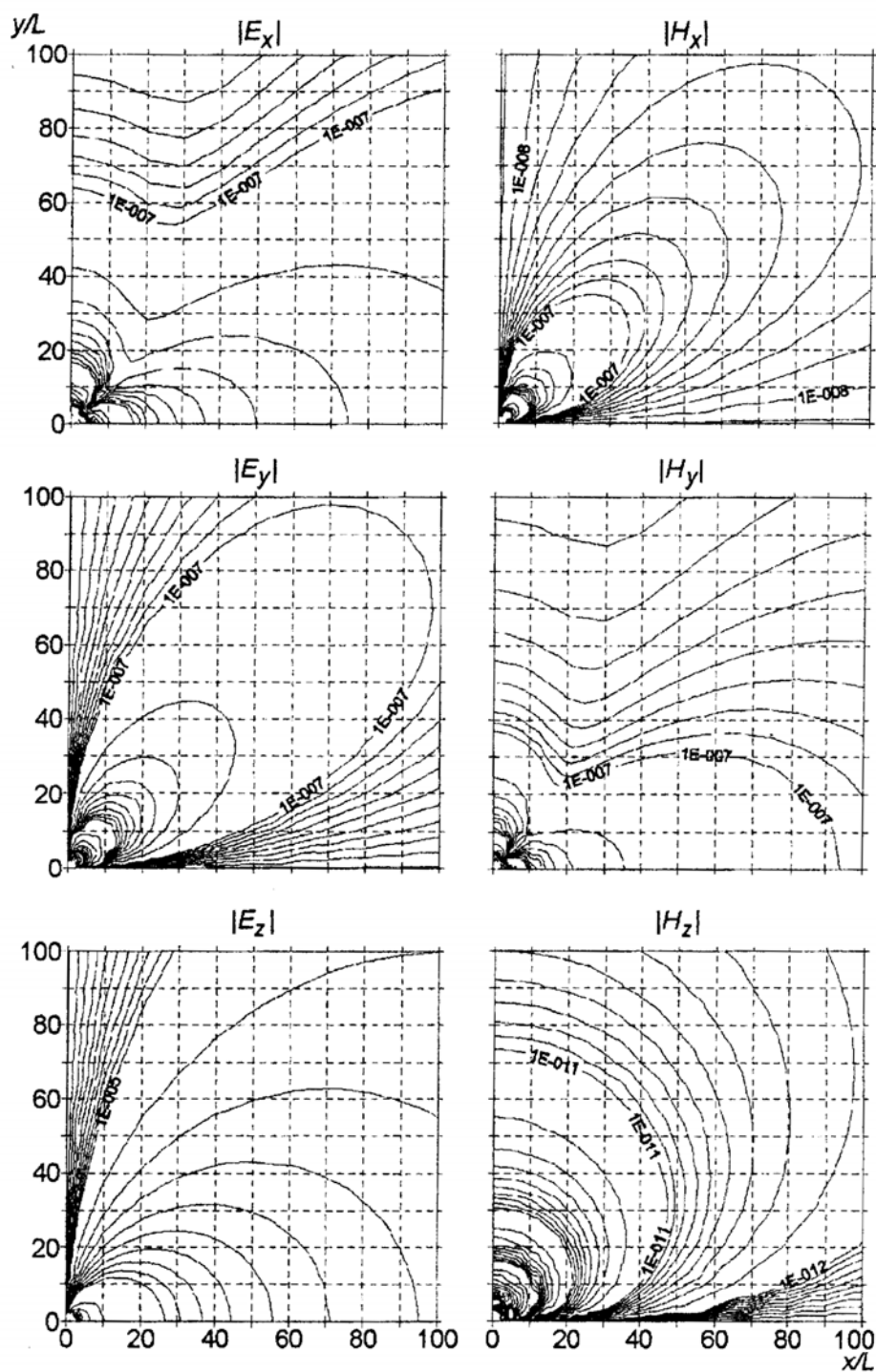


Рис. 6. Изолинии модулей составляющих электромагнитного поля на больших расстояниях от источника (поле в волноводе).

Характер изолиний составляющих квазистационарных полей  $E_z$  и  $H_z$  (рис. 5) аналогичен характеру этих же составляющих в волноводе: нулевые значения вдоль осей соответственно  $y$  и  $x$ , и изменения с определенным градиентом вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Влияние ионосферы и токов смещения в воздухе на больших расстояниях от СНЧ-радиостановки приводят также к изменению поляризации электрического и магнитного полей. При проведении расчетов без учета указанных факторов квазистационарные электрическое и магнитное поля в дальней зоне горизонтального

электрического диполя или кабеля конечной длины имеют линейную поляризацию. Результаты расчетов электрического поля в волноводе показаны на рис. 7. Вдоль осей  $x$  и  $y$  электрическое поле в горизонтальной плоскости имеет линейную поляризацию. По другим направлениям, как видно из приведенного рисунка, поляризация эллиптическая, причем эллиптичность поляризации (отношение  $b/a$  малой и большой полуосей эллипса поляризации) увеличивается по мере удаления от источника и приближения к направлению, ориентированному под углом  $60 - 70^\circ$  к оси  $x$ .

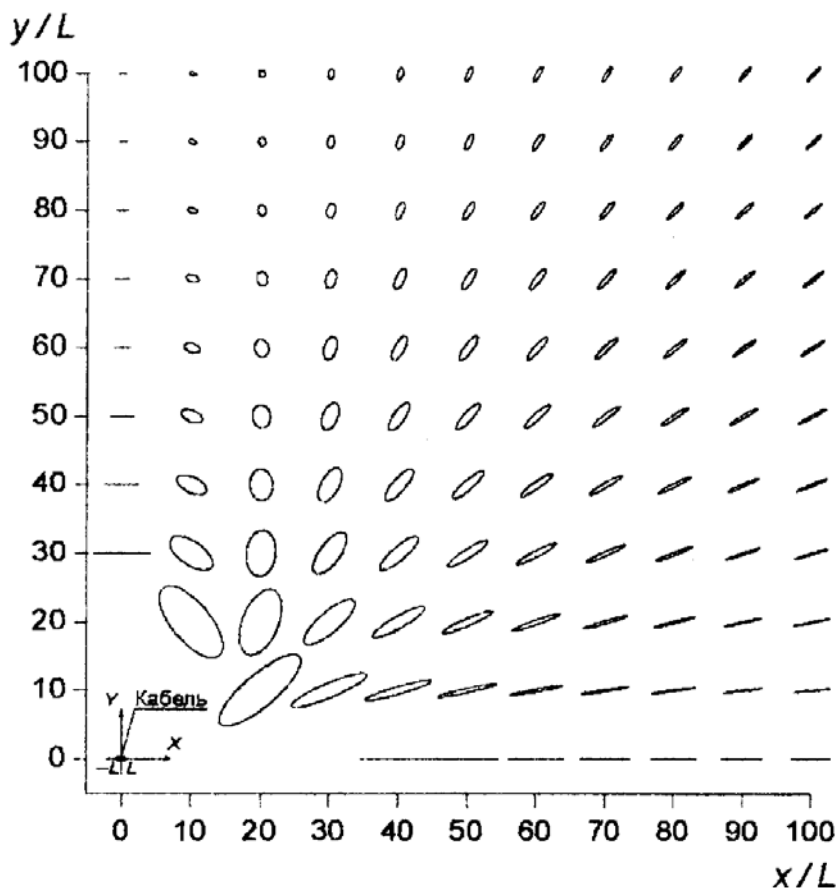


Рис. 7. Эллипсы поляризации горизонтальной составляющей электрического поля в плоскости  $XY$ .

Наличие эллиптичности поляризации электрического и магнитного полей СНЧ-радиоустановки было установлено нами ранее по результатам экспериментальных работ [22]. Были выполнены круговые измерения составляющих электрического и магнитного поля на различных расстояниях от источника: около г. Апатиты (150 км от источника), в пос. Вокнаволоок (470 км) и на полигоне Вуокса, Карельский пер. (950 км). В результате установлено увеличение эллиптичности поляризации, которая менялась последовательно по мере удаления от источника и составляла для магнитного поля соответственно  $b/a = 0,07; 0,25; 0,3$ . По расчетам с использованием разработанных программных средств эти значения для указанных точек были соответственно равны  $b/a = 0,026; 0,22; 0,32$ .

Изменение эллиптичности поляризации электрического поля СНЧ-радиоустановки в волноводе земля - ионосфера иллюстрируется рис. 8, *a*, на котором представлены изолинии отношения  $b/a$  в горизонтальной плоскости. Для параметров, принятых при проведении расчетов, эллиптичность поляризации становится заметной ( $b/a = 0,1$ ) на удалении 300 км от источника по направлению, ориентированному под углом  $45^\circ$  к оси  $x$ . В наибольшей степени эллиптичность поляризации проявляется на рассматриваемом планшете для области  $x/L = 20$  и  $y/L = 80-100$ , где она приближается к круговой ( $b/a = 0,8$ ). Эта область совпадает с зоной минимальных значений  $E_x$ , отмеченной ранее при анализе характера изолиний данной составляющей электрического поля (см. рис. 6).

На рис. 8, *б* показаны изолинии углов поворота  $\alpha$  больших осей эллипсов поляризации электрического поля относительно оси  $x$ . Анализ приведенных изолиний показывает, что для направлений, ориентированных под углами от  $0$  до  $60-70^\circ$  относительно направления кабеля, значения  $\alpha$  меняются закономерно, примерно совпадая с указанными направлениями и принимая значения от  $\alpha = 0$  до  $\alpha = 60 - 70^\circ$ . Однако для направлений,



приближающихся к экваториальной зоне кабеля (ориентированных под углами от  $60-70^\circ$  до  $90^\circ$  относительно направления кабеля), эти углы меняются намного быстрее от  $\alpha = 60-70^\circ$  до  $\alpha = 180^\circ$ .

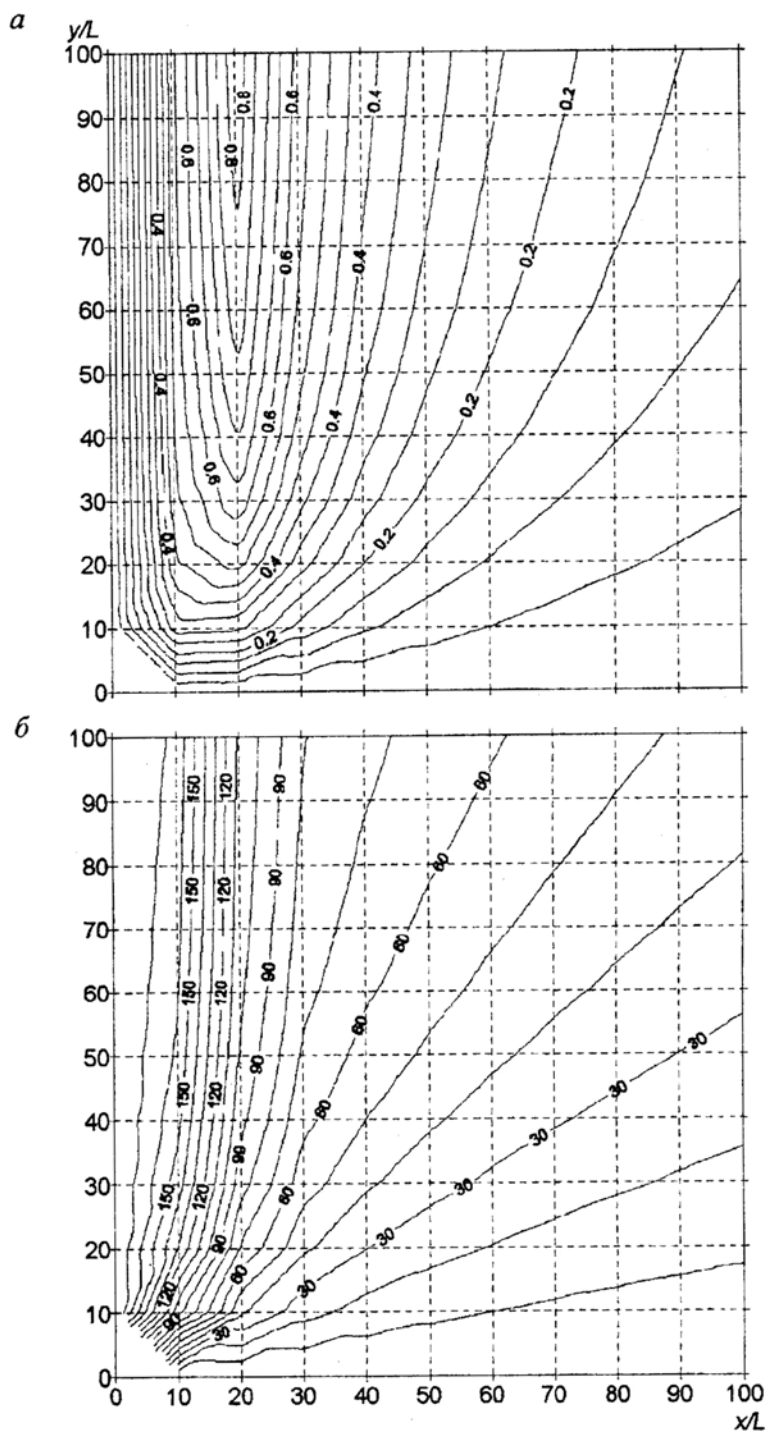


Рис. 8. Изолинии эллиптичности поляризации (а) и углов поворота больших осей эллипсов поляризации (б) горизонтальной составляющей электрического поля в плоскости  $XU$ .

Приведенные материалы свидетельствуют о том, что при измерении полей СНЧ-радиоустановки вблизи экваториальной зоны данного источника необходимо уделять особое внимание выбору оптимальной ориентации измерительной установки. Работы по сверхнизкочастотному зондированию на разных частотах или мониторингу на одной частоте необходимо сопровождать круговыми измерениями электрического и магнитного полей. При этом следует учитывать то обстоятельство, что в реальных условиях возможно дополнительное изменение ориентации горизонтальной составляющей вектора электрического поля за счет влияния неоднородностей среды.

### **В заключение можно сделать следующие выводы.**

На основе строгого решения задачи о поле горизонтального электрического диполя и кабеля конечной длины в плоском волноводе земля-ионосфера получены выражения и разработаны программные средства для расчетов составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки "Зевс". В отличие от подходов, реализованных при решении задач распространения радиоволн и связи, в которых, с одной стороны, рассматривается сферическая модель волновода и учитываются особенности строения ионосферы, а с другой стороны, применяются асимптотические формулы для вычисления составляющих поля, нами использовано решение без упрощающих допущений о параметрах источника и свойствах среды, но при упрощенной модели волновода и ионосферы. Данный подход нацелен на изучение структуры электромагнитного поля источника применительно к решению геолого-геофизических задач и прогнозированию землетрясений. Созданные программные средства позволяют проводить расчеты полей СНЧ-радиоустановки как в непосредственной близости от источника, так и на удалении от него до расстояния примерно 3000 км, когда необходим учет сферичности волновода земля-ионосфера. В разработанных программах производится численное интегрирование комплексных выражений, содержащих осциллирующие функции Бесселя, с относительной погрешностью  $10^{-9}$ .

В результате выполненных исследований показано, что при проведении расчетов составляющих электромагнитного поля на значительном удалении от источников такого типа даже для сверхнизких частот (десятки-сотни герц) необходим учет токов смещения в воздухе. Это обусловлено влиянием членов в общем решении задачи, содержащих множители  $k_0 r$ , вклад которых при малых значениях волнового числа воздуха  $k_0$  и больших расстояниях  $r$  (сотни-тысячи километров) становится весьма заметным. Влияние токов смещения в воздухе приводит к увеличению амплитуды составляющих электромагнитного поля и существенному изменению диаграммы направленности данного источника

Показано, что в результате влияния ионосферы и токов смещения в воздухе составляющие электрического и магнитного полей становятся эллиптически поляризованными, причем эллиптичность поляризации возрастает с удалением от источника. Выделены зоны, в которых эллиптичность поляризации проявляется в наибольшей степени, а также наиболее быстро изменяются углы поворота больших осей эллипсов поляризации, составляющих поля в горизонтальной плоскости

По материалам выполненных расчетов проведен анализ закономерностей изменения составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки в плоском волноводе земля-ионосфера. Показано, что влияние ионосферы в наименьшей степени проявляется для вертикальной составляющей магнитного поля. Для различных составляющих поля определены расстояния, начиная с которых становится заметным влияние токов смещения и ионосферы, а также можно использовать аппроксимацию рассматриваемого источника вместо кабеля диполем.

Установленные закономерности изменения электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки следует использовать при планировании работ с данным источником, разработке методик комплексирования с другими электромагнитными методами и применении СНЧ-радиоустановки при решении геолого-геофизических задач и прогнозировании землетрясений. Рассмотренные особенности поля необходимо также учитывать при проведении глубинных электромагнитных зондирований с источниками, аппроксимируемыми горизонтальным электрическим диполем, и большом расстоянии между источником и точкой наблюдения.

Работа выполнена при поддержке программы "Университеты России", проект № 2140, и ФЦП "Интеграция", проект № 32G.66.

### **Список литературы**

1. Сараев А. К., Пертель М. И., Парфентьев П. А. и др. Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей СНЧ-радиоустановки для целей прогноза землетрясений на Северном Кавказе // Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. между нар. конф., С.-Петербург, 15-18 октября 1996 г. СПб., 1996. С. 1-271.
2. Пертель М. И., Харламов М. М., Сараев А. К. Комплексирование А МТ-зондирований с измерениями полей СНЧ-радиоустановки // Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. междунар. конф., С.-Петербург, 15-18 октября 1996 г. СПб., 1996. С. 1-265.
3. Ивочкин В. Г., Сараев А. К., Никифоров А. Б. Поляризационные особенности электромагнитного поля промышленных ЛЭП // Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками: Тез. докл. междунар. конф., С.-Петербург, 27-31 мая 1996 г. СПб., 1996. С. 55-56.
4. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 2-е изд. Л.: Недра, 1980. 390 с.
5. Ваньян Л. Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.
6. Жданов М. С. Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.
7. Электроразведка: Справочник геофизика: В 2 кн. / Под ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко. Кн. 1. 2-е изд. М.: Недра 1989- 438 с.
8. Альперт Я. Л., Гусева Э. Г., Флигель Д. С. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля-ионосфера. М.: Наука, 1967. 123 с.
9. Макаров Г. И., Новиков В. В., Орлов А. Б. Современное состояние исследований распространения СДВ в полномодном канале Земля-ионосфера // Изв. вузов, Радиофизика

1970. Т. 13. № 3. С. 321-355.
10. Galeys J. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves. Oxford: Pergamon Press, 1972. 362 p.
  11. Bannister P. R. Summary of ELF propagation validation system field measurement. 1976 to 1978 // IEEE J. Oceanic Engineering. 1984. Vol. OE-9. N 3. P. 189-195.
  12. Корчагин Ю. А. Источники электромагнитного поля очень низких частот. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. 208 с.
  13. Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля-ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1994. 152 с.
  14. Кириллов В. В. Параметры волновода Земля-ионосфера в диапазоне СНЧ // Проблемы дифракции и распространения волн. Вып. 25. СПб., 1993. С. 35-52.
  15. Косткин П. М., Морозова О. М. Электромагнитное поле вертикального электрического диполя в приповерхностной области // Методы разведочной геофизики. Поиски и прогнозная оценка рудных месторождений методами электроразведки. Л., 1990. С. 113-124.
  16. Вешев А. В., Косткин П. М., Морозова О. М. Электромагнитное поле вертикального электрического диполя, расположенного в пласте постоянной мощности. Дет в ВИНТИ. № 7895-B88. Л., 1988. 30 с.
  17. Вешев А. В., Ладатко О. Н., Морозова О. М. Нормальное поле вертикального магнитного диполя // Вопросы геофизики. Вып. 30. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. С. 159-204.
  18. Кронрод А. С. Узлы в веса квадратурных формул. М. Наука, 1964. 143 с.
  19. Савинова Л. Т. О вычислении некоторых типов определенных интегралов от осциллирующих функций // Труды мат. ин-та им. В. А. Стеклова. 1962. Т. 16. С. 166-181.
  20. Longman S. M. A method for the numerical evaluation of finite integrals of oscillatory functions // Mathematics of Computation. 1960. Vol. 14. N 69. P. 53-59.
  21. Bessel functions. Part 1: Functions of order zero and unity British Association for the Advancement of Science: Mathematical tables, VI. Cambridge, 1937.
  22. Saraev A. K., Ivochkin V. G., Kostkin P. M., Kocherov A. B. Experimental and theoretical researches of polarization features of the ELF radio station electromagnetic field // Russian-German seminar "Actual problems in deep EM studies", Moscow, 11-13 March 1997: Abstract of communications. M., 1997. P. 30.
- 
- 

**Сараев А. К., Косткин П. М., Ивочкин В. Г. Особенности поляризации  
электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. // Физика Земли. 1998. № 7. С. 50-  
55.**

Институт земной коры Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия  
[aks@AS1002.spb.edu](mailto:aks@AS1002.spb.edu)

Рассмотрены результаты измерений характеристик поляризации электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки в точках, расположенных на различном расстоянии от источника. Проведено сопоставление с результатами расчетов по программам, разработанным на основе полного решения задачи об электромагнитных полях диполя и кабеля в плоском волноводе "земля-ионосфера". Установлено существенное влияние ионосферы и токов смещения на параметры поляризации первичного электромагнитного поля на больших расстояниях (сотни-тысячи километров) от источника. Показано возрастание степени эллиптичности поляризации с удалением от источника.

*СНЧ-радиоустановка, глубинная электроразведка, волновод "земля-ионосфера", поляризация.*

#### Введение

Новым направлением глубинной электроразведки является использование расположенной на Кольском полуострове (рис. 1) мощной сверхнизкочастотной (СНЧ) радиоустановки в качестве источника поля при проведении электромагнитных зондирований. Радиоустановка состоит из тиристорного генератора гармонически изменяющегося тока, емкостного согласующего устройства, а также горизонтально расположенной и ориентированной в широтном направлении антенны. Антенной является заземленная на концах линия электропередачи длиной около 60 км. Низкое сопротивление заземлений (единицы Ом) обеспечивается специальной конструкцией заземлителей, представляющих собой расположенные на глубине 0.5 м решетки из стальных полос площадью 1 км<sup>2</sup>. Величина тока в антенне составляет 200-300 А. Магнитный момент достигает значения 1.5x10<sup>11</sup> А/м<sup>2</sup>. Рабочие частоты меняются в диапазоне от первых десятков до первых сотен герц.

Значительная мощность СНЧ-радиоустановки обеспечивает возможность регистрации сигналов на больших удалениях (несколько тысяч километров) от источника, а использование гармонически изменяющихся полей позволяет реализовать высокую точность измерений и выполнять достоверную интерпретацию данных. Ранее были показаны принципиальные возможности применения данного источника для электромагнитных зондирований [Велихов и др., 1994] и мониторинга сейсмической активности [Сараев и др., 1996]. В настоящее время проводятся исследования электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, разработка аппаратурно-методических и программных средств для ее использования при решении геолого-геофизических задач. При

изучении структуры электромагнитного поля антенная система радиоустановки аппроксимируется заземленным кабелем конечной длины.

Важными характеристиками электромагнитных полей, используемых в методах электроразведки, являются особенности их поляризации [Бердичевский, 1968; Светов, 1973]. Эти особенности имеют большое значение для выбора методики измерений и интерпретации получаемых данных. Ранее были выполнены исследования поляризации электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки на относительно небольшом удалении от этого источника [Ивочкин, Сараев, 1994].

#### Экспериментальные данные

Для изучения особенностей поляризации электромагнитного поля на больших расстояниях от СНЧ-радиоустановки на частоте 80 Гц были выполнены экспериментальные многоазимутные измерения при различных удалениях точек наблюдения (рис. 1): на Кольском полуострове (точка Апатиты, расстояние от источника 150 км), в Карелии (Вокнаволоок, 470 км), на Карельском перешейке (Вуокса, 950 км). Измерялись горизонтальные составляющие электрического поля  $E$  с помощью заземляемого приемного диполя длиной 15-25 м и магнитного поля  $H$  с помощью индукционного магнитного датчика, ориентированного перпендикулярно электрическому диполю, при повороте установки через  $7.5^\circ$ - $30^\circ$ . При этом применялась аппаратура амплитудно-фазовых измерений промышленных полей АФИПП-1, предназначенная для электромагнитного профилирования с использованием полей СНЧ-радиоустановки и промышленных линий электропередач (точки Апатиты и Вокнаволоок) и аппаратура корреляционных функций АКФ-2.2, предназначенная для аудиоманнитотеллурических зондирований и измерений полей контролируемых источников, в том числе СНЧ-радиоустановки (точка Вуокса). Приборы АФИПП-1 и АКФ-2.2 созданы в Институте земной коры СПбГУ.

По результатам измерений построены полярные диаграммы составляющих поля  $E$  и  $H$  (рис. 2). Значения напряженности электрического поля откладывались по направлению приемного электрического диполя, а значения напряженности магнитного поля для удобства сопоставления построены с поворотом на угол  $90^\circ$  относительно направления магнитного датчика. По экспериментальным значениям составляющих поля проведены соприкасающиеся окружности, в наибольшей степени соответствующие точкам полярных диаграмм. В минимумах диаграмм переходы между окружностями проведены по значениям  $E$  и  $H$ , измеренным с более детальным шагом. При построении полярных диаграмм значения составляющих поля  $E$  и  $H$ , измеренные при несколько различающихся значениях тока источника, были приведены к единому уровню тока 200 А. С использованием максимальных и минимальных значений составляющих  $E$  и  $H$ , соответствующих большим (а) и малым (б) полуосям эллипсов поляризации, построены эллипсы поляризации электрического и магнитного поля (показаны на рис. 2 штрихпунктирными линиями).

Анализ полярных диаграмм и эллипсов поляризации для точки Апатиты показывает, что магнитное поле в данном случае поляризовано практически линейно, и для него характерно значение эллиптичности поляризации (отношения  $b/a$ ) равное 0.07 (рис. 2а). Электрическое поле характеризуется большей эллиптичностью поляризации ( $b/a = 0.2$ ). Особенностью приведенных на рис. 2а эллипсов поляризации составляющих  $E$  и  $H$  является несовпадение направлений их больших осей, равное  $11^\circ$ . Точка измерений Апатиты расположена под углом  $19^\circ$  от направления, ортогонального кабелю, и максимум сигнала  $E$  соответствует истинному азимуту  $\alpha = 95^\circ$  (истинный азимут определен по значению магнитного азимута  $\alpha_m$  с учетом магнитного склонения, равного в данной точке  $11^\circ$ ). Значение кажущегося сопротивления  $\rho_K$ , найденное для частоты 80 Гц по импедансу с использованием формулы для плоской вертикально падающей волны, равно 4000 Ом·м (возможность использования этого приближения для данной и других точек подтверждена расчетами поля СНЧ-радиоустановки).

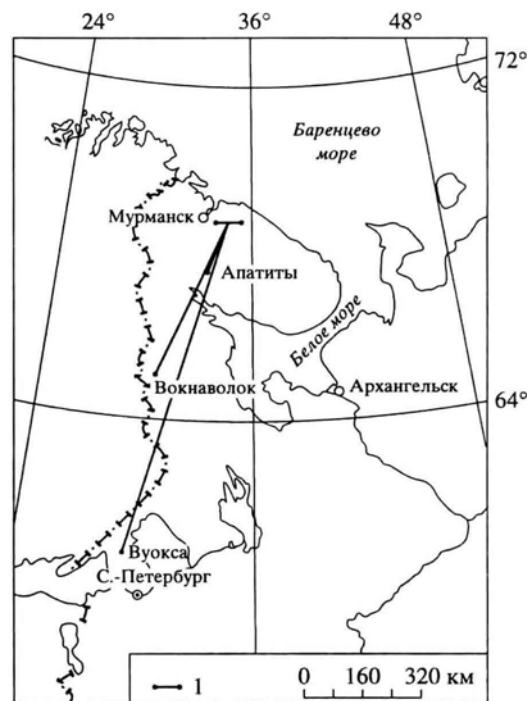


Рис. 1. Схема расположения СНЧ-радиоустановки и точек наблюдения. 1 - СНЧ-радиоустановка.

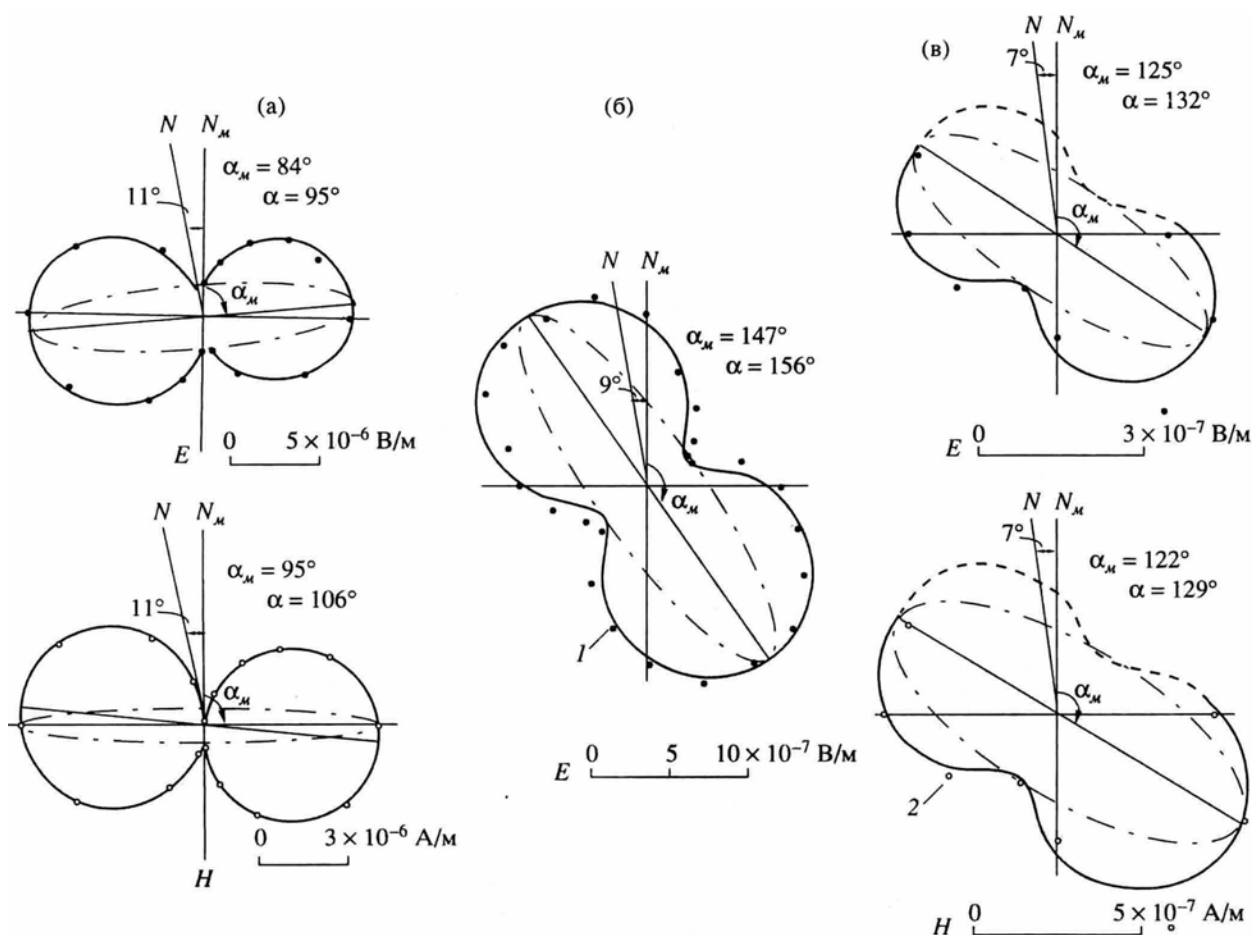


Рис 2. Экспериментальные полярные диаграммы горизонтальных составляющих  $E$  и  $H$  электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки и соответствующие им эллипсы поляризации в точках Апатиты (а), Вокнаволоок (б) и Вуокса (в).  $N, N_m$  – направление на север и магнитный север,  $\alpha$  и  $\alpha_m$  – истинный и магнитный азимуты. 1, 2 - значения напряженностей электрического и магнитного полей. Сплошными и пунктирными линиями построены полярные диаграммы, а штрихпунктирными – эллипсы поляризации.

Электрическое поле в точке Вокнаволоок характеризуется значением эллиптичности поляризации  $b/a = 0.25$ . Точка измерений расположена под углом  $22^\circ$  от направления, ортогонального кабелю, и максимум сигнала  $E$  соответствует  $\alpha = 156^\circ$ . Величина  $\rho_k$  в данной точке равна  $10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

В точке Вуокса минимумы круговых диаграмм составляющих поля  $E$  и  $H$  измерены менее детально, чем в предыдущих двух точках, однако значения эллиптичности поляризации можно оценить достаточно уверенно и они составляют 0.3 для полей  $E$  и  $H$ . Несовпадение направлений больших осей эллипсов поляризации электрического и магнитного поля относительно невелико и равно  $2^\circ$ . Данная точка расположена под углом  $15^\circ$  относительно направления, ортогонального кабелю, и максимум сигнала  $E$  соответствует  $\alpha = 132^\circ$ . Величина  $\rho_k$  в данной точке равна  $400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

#### Результаты расчетов

Данные измерений сопоставлялись с результатами вычислений, полученных с использованием созданных в Институте земной коры Санкт-Петербургского университета программ для расчета электромагнитных полей дипольных и линейных источников в слоистых средах. Эти программы основаны на строгих решениях задач с учетом всех электромагнитных параметров сред (удельного сопротивления, диэлектрической и магнитной проницаемостей) и позволяют вычислять поля при произвольном расположении источника и точки наблюдения в широком диапазоне частот от долей герц до десятков мегагерц. Для одного из источников - вертикального электрического диполя, результаты расчетов с помощью разработанных программ детально рассмотрены в работе [Косткин, Морозова, 1990].

При проведении расчетов электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки вычислялись составляющие электромагнитного поля заземленного на концах кабеля конечной длины, помещенного на нижнюю границу плоского волновода - слоя воздуха между двумя полупространствами: землей и ионосферой (рис. 3). В используемом решении задачи учитываются электромагнитные параметры всех трех сред (земли, воздуха и ионосферы) и токи смещения. Поле кабеля находится интегрированием по длине кабеля составляющих поля горизонтального электрического диполя.

В программах производится численное интегрирование комплексных выражений, содержащих осциллирующие функции Бесселя. Относительная погрешность вычислений -  $10^{-9}$ . По результатам расчетов установлены области, в которых может быть использована аппроксимация антенной системы вместо кабеля диполем.

Необходимость решения задачи с учетом волнового числа воздуха  $k_0$  обусловлена тем, что даже для сверхнизких частот при очень больших расстояниях  $r$  (сотни-тысячи километров) вклад членов в общем решении задачи, содержащих множители  $k_0 r$ , является весьма значительным.

На относительно небольших расстояниях от рассматриваемого источника расчеты нормальных полей могут производиться по низкочастотным формулам для полупространства, а при удалении необходимо использовать решение задачи с учетом токов смещения и влияния ионосферы.

Результаты расчетов по профилям вкост кабеля: проходящему через центр кабеля ( $x/L = 0$ ) и смещенному в сторону от центра ( $x/L = 10$ ), а также вдоль кабеля ( $y/L = 0$ ), где  $L$  - полудлина кабеля, приведены на рис. 4. Расчеты выполнены для частоты 80 Гц, удельных сопротивлений земли и ионосферы, соответственно равных  $10^4$  и  $10^5$  Ом·м, длины кабеля  $2L = 60$  км и высоты ионосферы  $d = 90$  км.

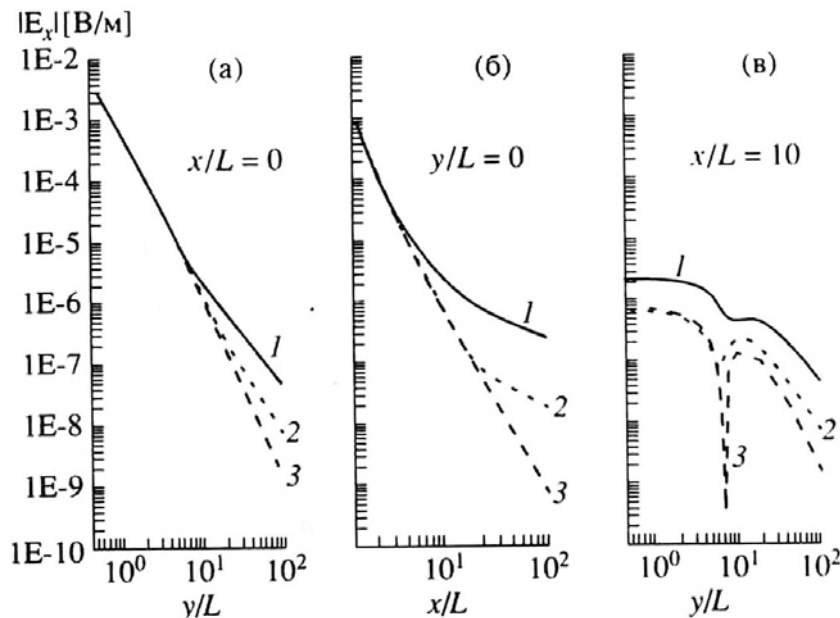


Рис. 4. Результаты расчетов составляющей  $E_x$  электромагнитного поля кабеля по профилям  $x/L = 0$  (а),  $y/L = 0$  (б) и  $x/L = 10$  (в). 1 - расчеты с учетом токов смещения и ионосферы; 2 - без учета ионосферы; 3 - без учета токов смещения и ионосферы.

выше параметров составляющие  $E_x$  и  $H_y$  в дальней зоне по направлению вкост кабеля в два раза превосходят соответствующие значения для направления вдоль кабеля. Наоборот, при расчетах с учетом токов смещения и влияния ионосферы составляющие  $E_x$  и  $H_y$ , начиная с расстояния 600 км по направлению вдоль кабеля

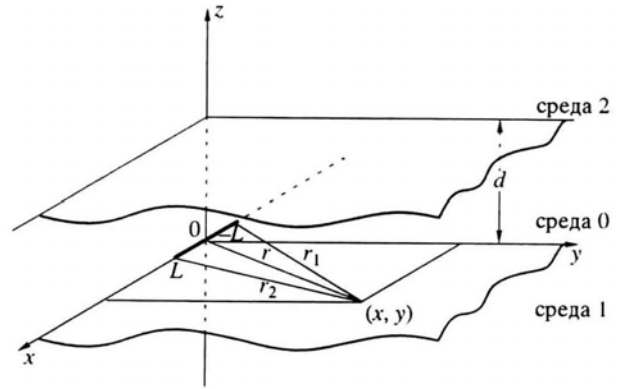


Рис. 3. Модель среды и источника, используемая при расчетах электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. Среда 1 - земля; среда 0 - воздух; среда 2 - ионосфера,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r$  — расстояния соответственно от заземлений и центра кабеля до точки наблюдения.

Как видно из приведенного рисунка, учет токов смещения для составляющей  $E_x$  необходим начиная с расстояний 300 км по направлению вкост и 600 км по направлению вдоль кабеля, а влияние ионосферы следует учитывать, начиная с расстояния 100 км по направлению вдоль и 200 км по направлению вкост кабеля. Аналогичные закономерности изменения характерны и для составляющей  $H_y$ . Оценки приведены для 10% отличий соответствующих значений составляющих поля.

При учете токов смещения и ионосферы существенным образом меняется диаграмма направленности поля данного источника. В случае использования низкочастотного решения без учета токов смещения и ионосферы для указанных

превышают соответствующие значения для направления вкрест кабеля (в пять раз на расстоянии 3000 км). Эти особенности диаграммы направленности СНЧ-радиоустановки подтверждаются данными экспериментальных измерений.

### Анализ результатов

Сопоставление рассмотренных выше экспериментальных данных по измерениям параметров эллипсов поляризации электрического и магнитного полей и результатов расчетов показано в таблице.

**Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов параметров эллипсов поляризации электрического и магнитного полей СНЧ-радиоустановки**

Парам.	$E_{расч}$	$E_{расч}$ (норм)	$H_{расч}$	$H_{расч}$ (норм)	$E_{эксп}$	$H_{эксп}$
<b>Точка Апатиты</b>						
$\alpha$ , град	106.9	103.0	106.9	103.0	95	106
$b/a$	0.026	0.0017	0.026	0.0017	0.2	0.07
<b>Точка Вокнаволоок</b>						
$\alpha$	128.4	117.9	128.4	117.9	156	–
$b/a$	0.22	0.052	0.22	0.052	0.25	–
<b>Точка Вуокса</b>						
$\alpha$	110.6	103.1	110.6	103.1	132	129
$b/a$	0.32	0.12	0.32	0.12	0.3	0.3

Как следует из приведенных данных, эллиптичность поляризации для расчетных полей  $E_{расч}$  и  $H_{расч}$  в каждой точке одинакова и равна для точки Апатиты 0.026, для точки Вокнаволоок 0.22 и для точки Вуокса 0.32. Эти значения хорошо совпадают с экспериментальными данными  $E_{эксп}$  и  $H_{эксп}$  для точек Вокнаволоок и Вуокса. Для точки «Апатиты» измеренные и расчетные значения эллиптичности заметно отличаются, что обусловлено с одной стороны трудностью точного измерения небольших значений малых полуосей эллипсов поляризации в данной точке при дискретном (через 7.5°) шаге по углу поворота измерительной установки, а с другой стороны влиянием неоднородности среды в точке измерения, что проявляется в большей степени для поля  $E$ .

Достаточно хорошее совпадение наблюдается для азимутов  $\alpha$  больших осей эллипсов поляризации электрического и магнитного полей (здесь, как и ранее, азимут большой оси эллипса поляризации для  $H$  изменен на 90°). Для расчетных нормальных полей (над полупространством, без учета влияния ионосферы)  $E_{расч}(норм)$  и  $H_{расч}(норм)$  значения  $b/a$  для указанных точек соответственно равны 0.0017, 0.052 и 0.12, т.е. существенно отличаются от экспериментальных данных. В случае использования решения задачи о поле кабеля без учета токов смещения и влияния ионосферы по результатам расчетов во всех точках получается линейная поляризация полей  $E$  и  $H$  ( $b/a = 0$ ).

Полученные результаты свидетельствуют о возрастающей эллиптичности поляризации электрического и магнитного полей СНЧ-радиоустановки с удалением точки наблюдения от источника. Совпадающие экспериментальные и расчетные значения  $b/a$  полей  $E$  и  $H$  для точек Вуокса и Вокнаволоок говорят о том, что степень эллиптичности поляризации существенно зависит от особенностей распространения электромагнитного поля в волноводе "земля-ионосфера" на большом удалении от источника. На величину эллиптичности поляризации также влияют неоднородности среды в точке измерения. Однако, как показал опыт работ, влияние неоднородностей среды проявляется прежде всего в нарушении ортогональности больших осей эллипсов поляризации полей  $E$  и  $H$  в горизонтальной плоскости за счет разворота поля  $E$ .

Наглядно характер изменения эллиптичности поляризации поля  $E$  кабеля по результатам различных вариантов расчетов: с учетом токов смещения и ионосферы, без учета ионосферы и без учета токов смещения и ионосферы, показан на рис. 5. Как видно из рисунка, основной вклад в возрастание эллиптичности поляризации вносит влияние ионосферы. Рассматриваемые факторы (токи смещения, ионосфера), помимо изменения эллиптичности поляризации, приводят к изменению направления больших осей эллипсов поляризации по сравнению с векторами поля  $E$ , полученными по низкочастотным формулам без учета влияния токов смещения и ионосферы.

### Выводы

В результате выполненных экспериментальных измерений и расчетов электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки изучены особенности поляризации поля в точках, расположенных на различном расстоянии от данного источника. Показано достаточно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. При этом для вычисления полей СНЧ-радиоустановки использованы программные средства, разработанные на основе полного решения задачи с учетом токов смещения и влияния ионосферы.

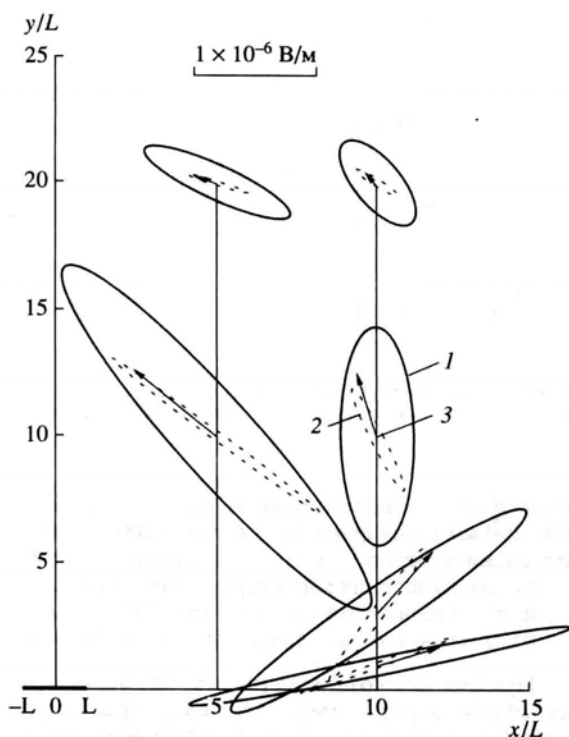


Рис. 5. Характер изменения эллиптичности поляризации горизонтальной составляющей электрического поля СНЧ-радиоустановки по профилю  $x/L = 5$  для точек  $y/L = 10; 20$  и по профилю  $x/L = 10$  для точек  $y/L = 1; 3; 10; 20$ . 1 - расчеты с учетом токов смещения и ионосферы; 2 - без учета ионосферы; 3 - без учета токов смещения.

На основе анализа результатов расчетов рассмотрены особенности поля СНЧ-радиоустановки. Установлено, что для приведенных в статье условий учет токов смещения необходим начиная с расстояний 300 км по направлению вкрест и 600 км для направления вдоль антенной системы, а влияние ионосферы следует учитывать начиная с расстояния 100 км по направлению вдоль и 200 км по направлению вкрест антенной системы.

Материалы выполненных работ показывают необходимость корректировки существующих представлений об отсутствии фазовых сдвигов и линейной поляризации первичных электрического и магнитного полей на больших расстояниях от контролируемых источников такого типа (горизонтального электрического диполя, кабеля), используемых в методах электромагнитных зондирований. Из-за особенностей распространения в волноводе "земля-ионосфера" и влияния токов смещения первичное поле поляризовано эллиптически, причем степень эллиптичности поляризации увеличивается с удалением от источника.

#### Список литературы

1. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 256 с.
2. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А. и др. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона // ДАН РАН. 1994. Т. 338. № 1. С. 106-109.
3. Ивочкин В.Г., Сараев А.К. Влияние поляризации электромагнитного поля на характер круговых диаграмм эффективного сопротивления и фазы импеданса // Российский геофизический журнал. 1994. №2. С. 11-18.
4. Косткин П.М., Морозова ОМ. Электромагнитное поле вертикального электрического диполя в приповерхностной области // Методы разведочной геофизики. Поиски и прогнозная оценка рудных месторождений методами электроразведки. Л.: НПО "Рудгеофизика", 1990. С. 113-124.
5. Сараев А.К., Пертель М.И., Парфентьев П.А. и др. Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей НЧ-радиоустановки для целей прогноза землетрясений на Северном Кавказе // Закономерности эволюции земной коры (тез. докл.) Т. 1. СПб: СПбГУ, 1996. С. 271.
6. Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 256 с.



**Zhamaletdinov A.A.<sup>1</sup>, Shevtsov A.N.<sup>1</sup>, Pertel' M.I.<sup>2</sup> (1998). Electromagnetic sounding and monitoring in the field of ELF antenna with taking into account the influence of ionosphere and displacement currents // 14-th EM Workshop, Sinaia, 1998. Book of Abstracts, page 159.**

<sup>1</sup>Geological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, ul. Fersmana, 14, Apatity, Russia, abd.zham@mail.ru

<sup>2</sup>Earth Crust Institute, State University, St. Petersburg

New possibilities in the Earth Crust electromagnetic sounding and monitoring was opened due to use of the powerful ELF antenna (in frequency range 31-166 Hz), situated on the north of the Kola Peninsula. Experimental researches illustrate high resolution of signals measured at distances up to several thousand kilometres from the source. Results of the soundings at distances 300 km from the source and more showed that apparent resistivity curves, obtained from normalisation by electric and magnetic components happened to be strongly diverged from those one obtained by normalisation through effective impedance. For to explain the phenomena theoretical calculations were made with the use of the program for EM field for electrical dipole over horizontal layered model in presence of conductive ionosphere in the upper half-space. The solution of the problem has been made on the basis of algorithm presented in [Boerner, West, 1989]. The program has been made without quasistatic restrictions. Both approximations have been studied - the wave type and the diffusion type. Results of calculations gave possibility to explain experimental results by common influence from ionosphere (at moderate and high frequencies (31-166 Hz) and displacement currents (at relatively more high frequencies 83-166 Hz). On the basis of theoretical research the behaviour of electromagnetic field has been investigated in frequency range 1-1000 Hz and at distances from 100 till 3000 km in approximation of horizontally layered Earth and flat wave-guide "Earth - Ionosphere". The use of the ELF antenna for the earth quakes prediction needs in study for the influence from tide phenomena caused by the Moon and Sun. For the purpose special long term electromagnetic monitoring has been performed. Results showed the clear changes of apparent resistivity and phase shifts correlated with the Earth deformations from tides.

**References**

1. Boerner, D.E. and West, G.F., Geophys. J, 1989, vol. 97, no. 3, pp. 529-547.

**Zhamaletdinov A. A.<sup>1</sup>, Shevtsov A. N.<sup>1</sup>, Tokarev A.D.<sup>1</sup>, Kononov Yu.M.<sup>2</sup>, Van'yan L.L.<sup>3</sup> Influence of the Ionosphere and Bias Currents upon the Results of Deep Electromagnetic Soundings in the ELF Antenna Field // Doklady Earth Sciences, Vol. 367, No. 5, 1999, pp. 678–681.**

Translated from Doklady Akademii Nauk, Vol. 366, No. 5, 1999, pp. 688–691.

<sup>1</sup>Geological Institute, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, ul. Fersmana, 14, Apatity, Murmansk oblast, 184200 Russia, abd.zham@mail.ru

<sup>2</sup>Administration Department, Russian Academy of Sciences, Moscow, yurij.kononov.1947@mail.ru

<sup>3</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii prosp. 36, Moscow, 117218 Russia

Radio transmitting installations of the extralow-frequency (ELF) range represent a new kind of electromagnetic field source, which can be used both for solving the problem of telecommunication, and for accomplishing deep electromagnetic soundings of the Earth [8, 9]. The first experiment of such research was executed in Southern Finland with the use of the "Zeus" ELF transmitter located in the Kola peninsula [5, 7]. The transmitting antenna is a grounded transmission line at a length of about 60 km. The equivalent horizontal magnetic moment of the antenna reaches  $1.5 \times 10^{11} \text{ A m}^2$ .

The main feature of the results obtained was the great discrepancy between the curves of apparent resistivity  $\rho_T$  obtained by normalization over the source impedance  $E/H$  and the curves  $\rho_\omega$  obtained by normalization over the wave zone for electrical and magnetic fields. Curves  $\rho_\omega$  were shifted towards the higher domain by almost one order of magnitude, in comparison with curves  $\rho_T$ . The shift is explained by the weak attenuation of the ELF waves in the ionosphere waveguide. It resulted in the overestimation of amplitudes of electrical and magnetic field components in comparison with the calculated data for a stratified half-space.

The preliminary understanding of the effect of the ionosphere upon the results of deep soundings of the Earth was confirmed by observations along the regional profile Kola peninsula-Karelia-Finland (Fig. 1).

Fig. 2 presents curves of apparent resistivity obtained by normalization to the total electrical field  $\rho_\omega^{tot} = K^{tot} E^{tot}$ , and curves of apparent resistivity  $\rho_T^{eff}$  obtained by normalization to the total impedance

$$\rho_T^{eff} = 0.2T |Z^{eff}|^2, \quad \text{where } Z^{eff} = \sqrt{E_x E_y / H_x H_y}.$$

The results displayed in Fig. 2 demonstrate a sharp difference between the curves  $\rho_\omega^{tot}$  and  $\rho_T^{eff}$ .

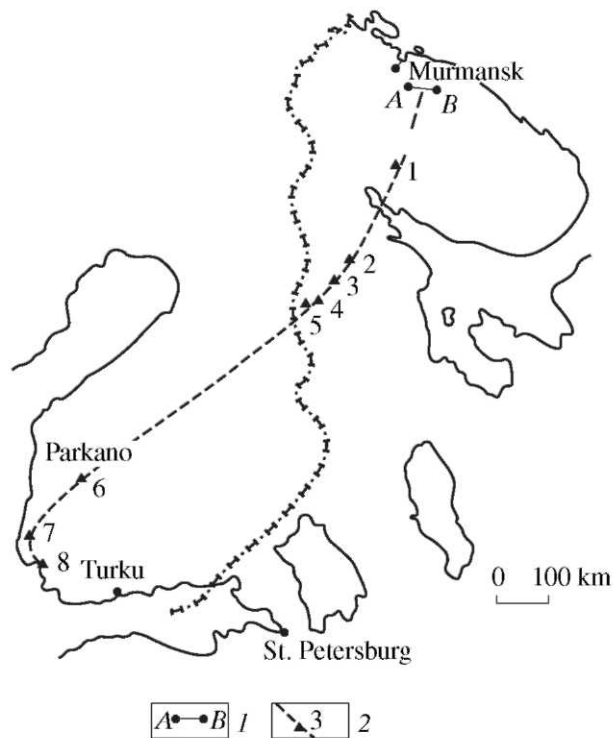


Fig. 1. Location of the profile of observations of the "Zevs" source signals along the route Kola Peninsula-Karelia-Finland. (1) location of "Zevs" source; (2) location of the profile and the numbers of observation

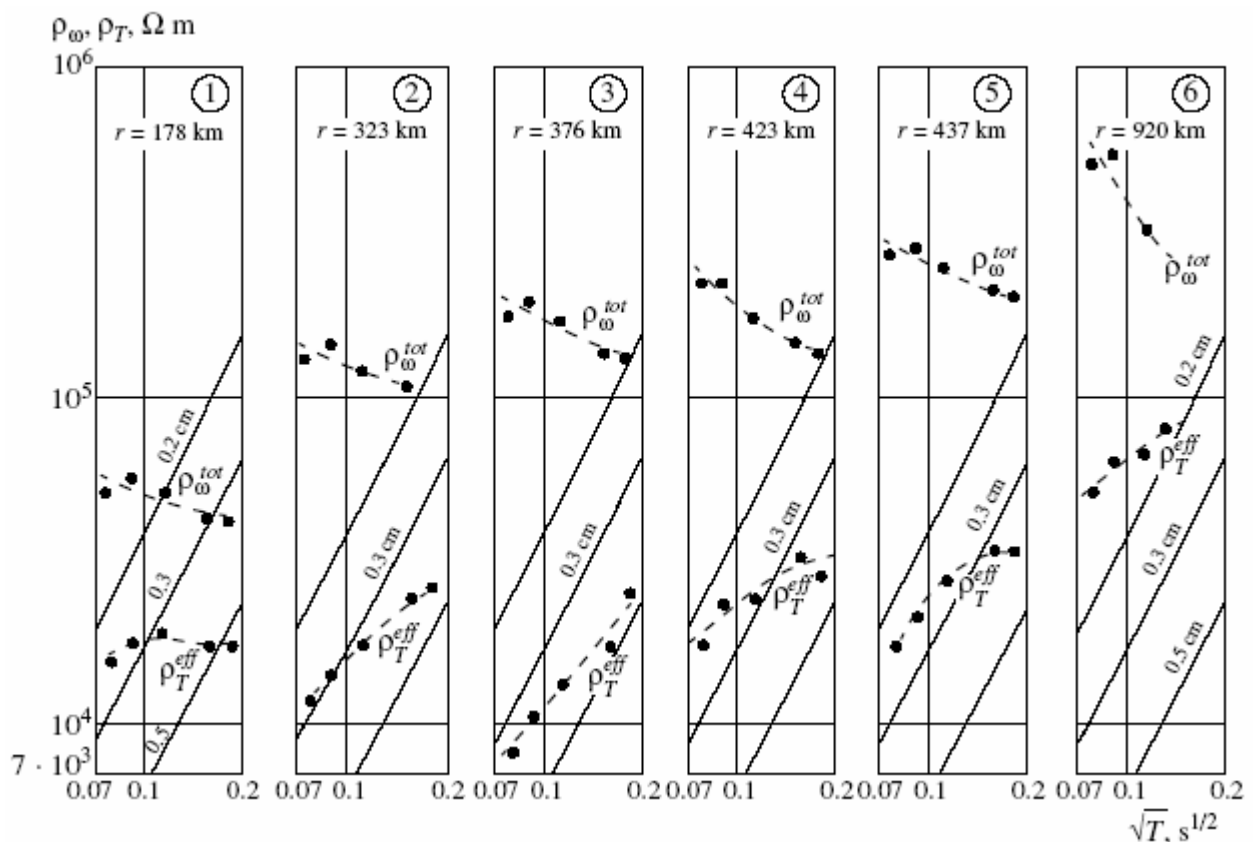


Fig. 2. Results of soundings with the "Zevs" source along the route Kola Peninsula-Karelia-Finland (location of points and their numbers are indicated in Fig. 1):  $\rho_{\omega}$ , curves of apparent resistivity over the complete electrical field

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}; \rho_{\omega} \text{ curves of apparent resistivity over the effective impedance } Z = \sqrt{E_x E_y / H_x H_y}$$

The curves  $\rho_{\omega}^{tot}$ , obtained by normalization to the total electrical field, have approximately identical shapes at all points. They reveal an average monotonous recession of  $\rho_{\omega}^{tot}$ , which would seem to indicate a decrease in the resistivity of rocks in deeper zones of the Earth's crust. However, the impedance curves of apparent resistivity  $\rho_T^{eff}$  show a completely different (ascending) pattern indicating the increase of resistivity with depth. A practically parallel shift of curves  $\rho_{\omega}^{tot}$  upward along the axis of resistivity, in accordance with increasing distance from the source, is another important feature. At a distance of 920 km, magnitudes of  $\rho_{\omega}^{tot}$  reach exotic magnitudes of  $(5-7) \times 10^5 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$ .

The analysis of the physical nature of the obtained curves of apparent resistivity requires the calculation of the electromagnetic field of ELF waves in the "Earth-ionosphere" waveguide, with an allowance for the properties of the lower half-space. The majority of known methods for calculation are based on the concept of homogeneous properties of the walls of the ionosphere waveguide [1-3, 13].

The theory of calculations for the case of arbitrary dependence of the conductance of the Earth and ionosphere of the radial coordinate is

developed in [9]. It is based on the of quasigeometrical-optic approach, which is only applicable for high frequencies (>1000 Hz) and for large distances from the source (>1000 km).

At comparatively small distances from the source (up to 1000 km), the sphericity of the Earth can be neglected. In this case, a rigorous solution to the problem can be obtained on the use of an electrodynamics approach based on the calculation of electromagnetic field components above a flat one-dimensional horizontal-stratified model of the lower half space, if interface of the ionosphere is present in the upper halfspace. It can also be generally represented by a stratified model. The most complete solution to this problem proposed in [11] is based on using linear combinations of elements from a matrix of distribution of poloidal and toroidal modes of the electromagnetic field. The above solution has made it possible to compile a program for calculating both the direct and inverse problems of soundings with monitored sources; this program was used for the analysis of the “Zevs” source field [10]. It is admitted that field excitation does not affect the current in the source. For calculating the Hankel transform to the set accuracy, we used the direct integration between the zeroes of Bessel functions with Pade approximation of the integrand [12].

The example for comparison of the calculation results with the experimental data at Parkano location ( $r = 920$  km) is indicated in Fig. 3. The model of conductance of the lower half-space is set by the results of soundings with the Khibines MHD source [6]. The calculations were executed in two variants of computing procedures: in the first variant, computational formulas were limited by the domain of quasistationary approximation (disregarding bias currents,  $\epsilon\epsilon_0\omega \ll \sigma$ ); in the second variant, no limitations were entered for the quasistationary state; i.e., the computational formulas described both extreme cases of the field propagation (with the allowance for bias currents,  $\epsilon = 1$ ). In both cases, the ionosphere was presented as conducting the upper half-space with a resistivity of  $10^4$  Ohm·m at an altitude of 100 km.

Results of the calculations demonstrate that the impedance curves  $\rho_T^{theor}$  are practically not subject to the influence of ionosphere and bias currents (Fig. 3). Their character adequately reflects the properties of the lower half-space. At the same time, the influence of both the ionosphere and the bias currents is clearly observed upon the curves of apparent resistivity of the total complete electrical field  $\rho_\omega^{theor}$ . The influence of the ionosphere starts to manifest at the lowest frequencies of ELF range, beginning at a frequency of 1-0.5 Hz, in the form of excess of the magnitudes of  $\rho_T^{theor}$  over the  $\rho_\omega^{theor}$  curve, which gradually increases with the growth of frequency and, at frequencies higher than 100 Hz, transforms into the parallel shift of curves by approximately 0.7 order of magnitude. The influence of the bias currents is observed at much higher frequencies (100 Hz and above) and manifests in a sharply ascending character of curves  $\rho_\omega^{theor}$ . Such a character is in good agreement with both the experimental curves  $\rho_\omega^{exp}$  (Figs. 2, 3), and the results in [4].

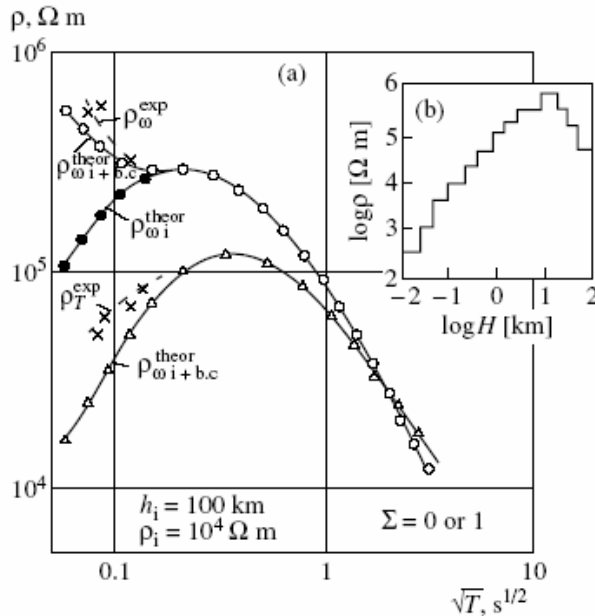


Fig. 3. (a) Theoretical and experimental curves of the apparent electrical resistivity in the “Zevs” antenna field in Parkano at a distance of 920 km from the “Zevs” source. (b) Accepted for calculations model of the lower half-space. ( $\rho_T^{theor}$ ) theoretical curves of apparent resistivity over the complete impedance; ( $\rho_T^{exp}$ ) experimental curves of apparent resistivity over the complete impedance; ( $\rho_\omega^{theor}$ ) curves of apparent resistivity over the complete electrical field: ( $\rho_{\omega i}$ ) with the allowance for ionosphere, ( $\rho_{\omega i+b.c.}$ ) with the allowance for the ionosphere and bias currents,  $\epsilon=1$ ), ( $\rho_\omega^{exp}$ ) experimental curves of apparent resistivity over the complete electrical field. Parameters of the ionosphere used in calculations: altitude  $h = 100$  km; resistivity  $\rho_i = 10^4$  Ohm·m.

Thus, the results of this research shows that the experimental curves of soundings accomplished with an ELF antenna acquire a physical explanation only when the influence of both bias currents and the ionosphere is taken into consideration in theoretical calculations. Such a conclusion essentially expands the concept that bias currents can only affect the results of deep electromagnetic soundings with monitored sources at sufficiently high frequencies described by the inequality  $\omega\epsilon\epsilon_0 \ll \sigma$ , where  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m is the dielectric permeability and  $\omega = 2\pi f$  is the circular frequency.

From this follows immediately that, when the specific conductance of the lower half-space achieves  $\sigma = 10^{-4}$  (Ohm·m) $^{-1}$ , the condition of the quasistationary state should hold up to a frequency of about  $10^7$  Hz. The influence of the bias currents observable in reality at much lower frequencies is explained in the following way: in the process of

deep soundings, it is necessary to take into account the final velocity of the electromagnetic field propagation; in air, from the radiator to the receiver [4]. In this case, restriction on the quasistationary state is supplemented by the condition  $r \ll \lambda_0/2\pi$ , where  $r$  is the distance between the radiator and the receiver, and  $\lambda_0$  is the wavelength in air,  $\lambda_0 = 2\pi/\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ .

As a result of the restriction on the wavelength in air, the bias currents can only be neglected at the distances  $r < 500$  km already at a frequency of 100 Hz.

The experimental and theoretical curves in Fig. 3 agree only in general. To achieve complete agreement, we should execute additional calculations with the introduction of more realistic values for the relative dielectric permeability  $\epsilon$  and more accurate data for the conductance of the Earth and the ionosphere. A good knowledge of the conductance of the Earth can make it possible to select more accurate parameters of the ionosphere, and vice versa.

The attenuation coefficient  $\alpha$ , which describes the exponential model of propagation of the field with the form  $A_r = A_0 e^{-\alpha r}$ , is an important parameter characterizing the propagation of the ELF waves in the Earth-ionosphere waveguide. Based on experimental results of the parameters of the lightning discharge (atmospherics) propagation and Schumann resonances, as well as the study of artificial signals of the Sangvin ELF system [3], the frequency dependence of attenuation, usually implemented in calculations, is demonstrated in Fig. 4 (curve 1). The computation of a similar frequency dependence of attenuation coefficient  $\alpha$  was accomplished on the basis of experimental observations of the "Zevs" source field, (Fig. 2). The  $\alpha$  value was calculated using the formula

$$\alpha = \frac{\log A_1 - \log A_2}{(r_2 - r_1) \log e}, \text{ dB/1000 km,}$$

where  $A_1, A_2$  are the field amplitudes at the observation points at distances of  $r_1 = 327$  km and  $r_2 = 920$  km from the radiator. The obtained experimental curve 2 (Fig. 4), which is also confirmed by the theoretical calculations (curve 3), differs from curve 1 by an ascending character. The noted discrepancy can be explained by small distances from the radiator and by the fact that the observations were accomplished near the equatorial zone of the source. The increase of field attenuation with the decrease of frequency in Fig. 4 directly follows from the profiles of the experimental curves in Fig. 2, as well as from the general physical reasons regarding the predominant role of the effect of field absorption in the walls of a plane waveguide as a result of the frequency decrease in the equatorial zone of the source, where the influence of the bias currents is insignificant. At the same time, the absorption of the ELF waves on the dipole axis, where the influence of the bias currents sharply increases, is essentially reduced with increasing distance from the source, and the directional diagram of the ELF antenna acquires an elongated (along its axis) form with abrupt contractions in the equatorial zone.

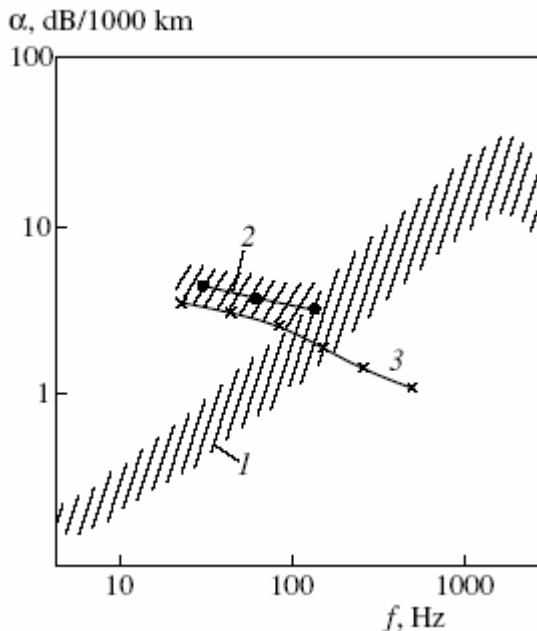


Fig. 4. Frequency dependences of the electromagnetic waves attenuation in the Earth-ionosphere waveguide.

(1) Generalized attenuation curve based on experimental data of global measurements at distances of thousands of kilometers [Bernstein, 1974]; (2) experimental attenuation curve obtained by measurements on low-conducting blocks of the Earth's crust of the Baltic Shield at distances up to 920 km in the "Zevs" source field; (3) theoretical attenuation curve calculated with the allowance for the normal model of the deep conductance of the Baltic Shield at distances of 300-1000 km in the equatorial zone of the source in the plane waveguide.

The results described allow us to refine the available concept about the features of the ELF waves propagation in the ionosphere waveguide, and to outline ways of applying the ELF antennas for solving the problems of deep sounding of the Earth and study of the ionosphere parameters.

#### References

1. Al'pert, Ya.L., O rasprostraneniі elektromagnitnykh voln nizkoi chastoty nad zemnoipoverkhnost'yu (Propagation of LF-Electromagnetic Waves above the Earth's Surface), Moscow: USSR Academy of Sciences,

- 1955.
2. Akindinov, V.V., Naryshkin, V.I., and Ryazantsev, A.M., Radiotekhn. Elektron., 1976, vol. 21, no. 5, pp. 913-944.
  3. Bernstein, S.L., Barrouz, M., Evans, D.E., et al., Proc.IEEE, 1974, vol. 62, pp. 5-30.
  4. Van'yan, L.L., Osnovy elektromagnitnykh zondirovaniya (Fundamentals of Electromagnetic Sounding), Moscow: Nedra, 1965.
  5. Velikhov, E.P., Zhamaletdinov, A.A., Sobchakov, L.A., et al., Dokl. Akad Nauk, 1994, vol. 338, no. 1, pp. 106-109.
  6. Zhamaletdinov, A.A., Model' elektroprovodnosti lito-sfery po rezul'tatam issledovaniya s kontroliruemymi istochnikami polya (Baltiiskii shchit, Russkaya platforma) (Models of the Lithosphere Electroconductivity in the Baltic Shield, Russian Platform: Evidence from Investigations with Monitored Field Sources), Leningrad: Nauka, 1990.
  7. Zhamaletdinov, A.A., Glubinye elektromagnitnye zondirovaniya s primeneniem impul'snykh MGD-generatorov (Deep Electromagnetic Sounding with the Application of MHD-Generators), Apatity, 1982, pp. 35-46.
  8. Kononov, Yu.M., Radio, 1996, no. 10, pp. 10-11.
  9. Makarov, G.I., Novikov, V.V., and Rybachek, S.T., Rasprostraneniye radiovoln v volnovodnom kanale "Zemlya-ionosfera" i v ionosfere (Radiowave Propagation in the "Earth-Ionosphere" Channel and Ionosphere), Moscow: Nauka, 1993.
  10. Shevtsov, A.N., Mater. IX molod. nauchn. konf. (Proc. IX Sci. Conf. of Young Scientists), Apatity, 1995, pp. 99-104.
  11. Boerner, D.E. and West, G.F., Geophys. J, 1989, vol. 97, no. 3, pp. 529-547.
  12. Chave, A.D., J. Geophys. Res., 1983, vol. 88, no. 4, pp. 3531-3542.
  13. Galejs, J., IEEE Trans. Antennas Propagat., 1968, vol. AP-16, pp. 689-700.

**Saraev A.K., Kostkin P.M. (2000) Waveguide zone of powerful source of electromagnetic fields //15th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth .August 19-26, 2000, Cabo Frio, Brazil, page 140. /theses/**

St. Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia, aks@AS1002.spb.edu

In realization of activities by CSAMT method with a source as horizontal electrical dipole or cable a near-field, transition and far-field zones are outlined, the measurements and data interpretation in which have a number of distinctions. While using powerful sources of electromagnetic field with a long-range action of hundred - thousand kilometers, similar to the Russian extremely low frequency (ELF) transmitter "Zeus", there is the necessity of additional selection of a waveguide zone. In this zone the field structure strongly depends on the influence of the ionosphere and displacement currents in the air and noticeably differs from the case of the far-field zone. The main differences consist of in slower fading of amplitudes of electrical and magnetic field components, change of directional diagram of the source, change of configuration of areas, favorable for measurements of  $Z_{xy}$  or  $Z_{yx}$  impedances, appearance of ellipticity of electrical and magnetic fields polarization. Distance, where the waveguide effects arise for the ELF transmitter "Zeus", is 100 km for the direction along and 200 km for the direction across antenna. These estimations made for the antenna length of 60 km, frequency of 80 Hz, resistivity of the earth and ionosphere accordingly equal to 10000 Ohm-m and 100 000 Ohm-m and altitude of the ionosphere of 90 km.

**Sobchakov L.A.,<sup>1</sup> Astakhova N.,<sup>1</sup> and Polyakov S.V. <sup>2</sup> (2003) Excitation of electromagnetic waves in a plane waveguide with anisotropic upper wall // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 46, No. 12, 2003 (Translated from Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Radiofizika, Vol. 46, No. 12, pp. 1027-1037, December, 2003. Original article submitted August 23, 2002.)**

<sup>1</sup> Russian Institute For Powerful Radio Construction, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia.

We solve the problem of propagation of electromagnetic ULF waves in a plane waveguide with anisotropic upper wall from an arbitrary source with allowance for an arbitrary inclination of the magnetic field. The procedure for calculating magnetic components of the signal radiated by horizontal and vertical dipoles is developed in detail. The solution is presented in the form of the Fourier-Bessel transform of the desired field components. Impedance-type boundary conditions were used for an arbitrary inclination of the magnetic field. The obtained solutions can be used for

interpreting experiments on measuring the spectra of ULF electromagnetic noise in various geographical regions and calculating parameters of ULF signals from controlled sources.

### 1. Introduction. Formulation of the problem

Although the studies of the problems of radio-wave propagation in the Earth-ionosphere cavity have been described in many papers (see, for example, monographs [1-4] and the references), the ULF range ( $f < 30$  Hz) is qualitatively special, which makes the solution of the problem under consideration much more difficult. First, in the ULF range, the ionosphere cannot even approximately be assumed a "perfect" (well conducting) wall, since the impedance of the atmosphere-Earth half-space is comparable with or greater than the ionospheric impedance. For this reason, the role of ionospheric anisotropy (gyrotropy) becomes much more pronounced for the ULF range [5, 6], which increases the problem dimension (azimuthal symmetry is absent) for the case of an oblique geomagnetic field. Then, in the ULF range, description of the fields in the Earth-ionosphere cavity is more complicated, since in the general case we are in the intermediate region between the wave and static zones. This paper is aimed at filling a gap in the available literature and develop the solution of the problem in question to be used for both estimates and numerical calculations.

It is expedient to mention another issue, which, strictly speaking, should also be taken into account, namely, large-scale horizontal ionospheric inhomogeneities. This issue is beyond the scope of this work and is most positively considered in the literature by the method of a two-dimensional telegraph equation [7, 8].

Let us consider the plane-layered model of the Earth-ionosphere cavity. We use the Cartesian coordinate system with the  $z$  axis directed vertically upwards. The Earth ( $z = 0$ ) is assumed to be perfectly conducting. It is assumed that the geomagnetic field lies in the  $yz$  plane and makes an angle  $\theta$  with the  $z$  axis. For the ionosphere ( $z = h$ ), we specify the impedance-type boundary conditions under which the electric  $E$  and magnetic  $H$  fields in the ionosphere are written in the form of electromagnetic waves propagating vertically upwards (along the  $z$  axis)

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y, \quad E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y. \quad (1)$$

If electrodynamics parameters of the ionosphere are described by the conductivity tensor

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

then we easily obtain the following analytical expressions for the components of the tensor of ionospheric surface impedance for the simplest case of a homogeneous ionosphere:

$$Z_{xx} = Z_{yy} = \frac{i(Z_1 - Z_2)\bar{\sigma}_{xy}}{\sqrt{4\bar{\sigma}_{xy}^2 - (\bar{\sigma}_{xx} - \bar{\sigma}_{yy})^2}}, \quad (3)$$

$$Z_{xy} = \frac{Z_1 + Z_2}{2} - \frac{Z_1 Z_2}{2(Z_1 + Z_2)} \frac{\bar{\sigma}_{xx} - \bar{\sigma}_{yy}}{\sqrt{\bar{\sigma}_{xy}^2 + \bar{\sigma}_{xx}\bar{\sigma}_{yy}}}, \quad (4)$$

$$Z_{yx} = -\frac{Z_1 + Z_2}{2} - \frac{Z_1 Z_2}{2(Z_1 + Z_2)} \frac{\bar{\sigma}_{xx} - \bar{\sigma}_{yy}}{\sqrt{\bar{\sigma}_{xy}^2 + \bar{\sigma}_{xx}\bar{\sigma}_{yy}}}, \quad (5)$$

where

$$\bar{\sigma}_{xx} = \frac{\sigma_{xx}\sigma_{zz} + \sigma_{xz}^2}{\sigma_{zz}}, \quad \bar{\sigma}_{yy} = \frac{\sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{yz}^2}{\sigma_{zz}}, \quad \bar{\sigma}_{xy} = \frac{\sigma_{xy}\sigma_{zz} - \sigma_{yz}\sigma_{xz}}{\sigma_{zz}}, \quad (6)$$

$Z_1 = \omega\mu_0/k_1$  and  $Z_2 = \omega\mu_0/k_2$  are the impedances of eigenwaves in the ionospheric plasma,  $k_1$  and  $k_2$  are the wave numbers of the ordinary and extraordinary waves, respectively,  $\omega$  is the wave frequency, and  $\mu_0$  is the magnetic constant. Due to a certain symmetry in the problem (with respect to the plane  $yz$ ), we have  $Z_{xx} = Z_{yy}$ . In the general case, for determining the components  $\hat{Z}$ , we should use numerical calculation. In what follows we assume that the  $\hat{Z}$  matrix is known. Let us write without derivation the required expressions for the elements of the tensor of transverse impedance in the cylindrical coordinate system

$$E_r = Z_{rr}H_r + Z_{r\varphi}H_\varphi, \quad E_\varphi = Z_{\varphi r}H_r + Z_{\varphi\varphi}H_\varphi, \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned}
Z_{rr} &= Z_{xx} - \Delta Z \sin(2\varphi), & Z_{\varphi\varphi} &= Z_{xx} + \Delta Z \sin(2\varphi), & Z_{r\varphi} &= Z - \Delta Z \cos(2\varphi), \\
Z_{\varphi r} &= -Z - \Delta Z \cos(2\varphi), & \Delta Z &= \frac{-Z_{xy} + Z_{yx}}{2}, & Z &= \frac{Z_{yx} - Z_{xy}}{2}.
\end{aligned}$$

The horizontal magnetic dipole equivalent to the horizontal grounded electric antenna is assumed to be the field source. First, for definiteness, we consider the case in which magnetic dipole is directed along the y axis.

## 2. Constructing exact solution

The solution of the problem is sought in the cylindrical coordinate system in the form of vertical components of electric and magnetic Hertz vectors,  $\Pi$  and  $\Pi^*$ , related to the field components by the known relations [9] (the time dependence of the fields is given by  $\exp(-i\omega t)$ )

$$\begin{aligned}
E_r &= \frac{\partial^2 \Pi}{\partial r \partial z} + i\omega\mu_0 \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi^*}{\partial \varphi}, & H_r &= -i\omega\varepsilon_0 \frac{1}{r} \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 \Pi^*}{\partial r \partial z}; \\
E_\varphi &= \frac{\partial^2 \Pi}{r \partial \varphi \partial z} - i\omega\mu_0 \frac{\partial \Pi^*}{\partial r}, & H_\varphi &= i\omega\varepsilon_0 \frac{\partial \Pi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Pi^*}{r \partial \varphi \partial z}.
\end{aligned} \tag{8}$$

The boundary conditions for the Hertz vectors for  $z = h$  are obtained directly from Eq. (7) with the use of Eq. (8). Omitting simple transformations, we write the final expressions

$$\begin{aligned}
\left( \frac{\partial}{\partial z} - ik_0 \delta \right) \nabla_\perp^2 \Pi - Z_{xx} \frac{\partial}{\partial z} \nabla_\perp^2 \Pi^* &= i\omega\varepsilon_0 \Delta Z L_1 \Pi + \Delta Z L_2 \frac{\partial \Pi^*}{\partial z}, \\
\left( \frac{\partial}{\partial z} - \frac{ik_0}{\delta} \right) \nabla_\perp^2 \Pi^* - i\omega\varepsilon_0 \frac{Z_{xx}}{Z} \nabla_\perp^2 \Pi &= -i\omega\varepsilon_0 \frac{\Delta Z}{Z} L_2 \Pi + \frac{\Delta Z}{Z} L_1 \frac{\partial \Pi^*}{\partial z},
\end{aligned} \tag{9}$$

where  $\nabla_\perp^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$  is the Laplace operator in the transverse coordinates

$$\begin{aligned}
L_1 &= \cos(2\varphi) \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right] + 2 \sin(2\varphi) \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right], \\
L_2 &= \sin(2\varphi) \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right] - 2 \cos(2\varphi) \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right],
\end{aligned}$$

$\delta = Z/Z_0$  is the reduced surface impedance of a homogeneous isotropic ionosphere, and  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ .

The boundary conditions for  $z = 0$  correspond to the case of a perfectly conducting plane and have the form

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z} = 0, \quad \Pi^* = 0. \tag{10}$$

The initial field of a horizontal magnetic dipole oriented along the y axis is written in the form of the Fourier-Bessel integrals

$$\Pi = -\frac{i\omega\mu_0 m}{2\pi} \cos \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \exp(-nz) \frac{d\lambda}{n}, \quad \Pi^* = \frac{m}{2\pi} \sin \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \exp(-nz) d\lambda, \tag{11}$$

where  $n = \sqrt{\lambda^2 + k_0^2}$  is the wave number in vacuum and,  $m$  [ $A \cdot m^2$ ] is the magnetic moment of the dipole. By analogy, for a magnetic dipole directed along the x axis, the corresponding expressions have the form dipole.

$$\Pi = \frac{i\omega\mu_0 m}{2\pi} \sin \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \exp(-nz) \frac{d\lambda}{n}, \quad \Pi^* = \frac{m}{2\pi} \cos \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \exp(-nz) d\lambda. \tag{12}$$

Without derivation, we write the well-known expressions for the Hertz vectors for the case of homogeneous isotropic waveguide (when  $\Delta Z = 0$  and  $Z_{xx} = 0$ )

$$\begin{aligned}\Pi_0 &= -i\omega\mu_0 \cos \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \frac{n \operatorname{ch}[n(h-z)] - ik_0\delta \operatorname{sh}[n(h-z)]}{n\Delta_1} d\lambda, \\ \Pi_0^* &= \sin \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \frac{n \operatorname{ch}[n(h-z)] - \frac{ik_0}{\delta} \operatorname{sh}[n(h-z)]}{\Delta_2} d\lambda,\end{aligned}\quad (13)$$

where

$$\Delta_1 = n \operatorname{sh} \gamma - ik_0\delta \operatorname{ch} \gamma, \quad \Delta_2 = n \operatorname{ch} \gamma - \frac{ik_0}{\delta} \operatorname{sh} \gamma, \quad \gamma = nh.$$

Hereafter, for definiteness, we consider a source with the moment  $(0, m, 0)$ , while the factor  $m/(2\pi)$  is omitted for the sake of simplicity. Note that Eq. (13) automatically satisfies the radiation condition at infinity.

It is expedient to consider the case of an anisotropic upper wall for  $\theta = 0$  ( $\Delta Z = 0$ ). In this case, boundary conditions (9) are significantly simplified and take the form

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - ik_0\delta\right) \Pi = Z_{xx} \frac{\partial \Pi^*}{\partial z}, \quad \left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{ik_0}{\delta}\right) \Pi^* = i\omega\varepsilon_0 \frac{Z_{xx}}{Z} \Pi. \quad (14)$$

The solution of the problem for  $\theta = 0$  is sought in the form

$$\begin{aligned}\tilde{\Pi}_0 &= \Pi_0 - i\omega\mu_0 \cos \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) A(\lambda) \frac{\operatorname{ch}(nz)}{n\Delta_1} d\lambda - i\omega\mu_0 \sin \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) C(\lambda) \frac{\operatorname{ch}(nz)}{n\Delta_1} d\lambda, \\ \tilde{\Pi}_0^* &= \Pi_0^* + \sin \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) B(\lambda) \frac{\operatorname{sh}(nz)}{\Delta_2} d\lambda + \cos \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) D(\lambda) \frac{\operatorname{sh}(nz)}{\Delta_2} d\lambda.\end{aligned}\quad (15)$$

Here,  $\Pi_0$  and  $\Pi^*$  are Hertz vectors (13) satisfying isotropic boundary conditions and  $A(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$ ,  $C(\lambda)$ , and  $D(\lambda)$  are the unknown functions of the integration constant, which should be found from boundary conditions (14). These formulas automatically satisfy the boundary conditions on the Earth's surface.

Omitting simple but cumbersome algebra, we write the final expressions

$$\begin{aligned}\Pi &= -i\omega\mu_0 \cos \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \frac{\Delta_2 \{n \operatorname{ch}[n(h-z)] - ik_0\delta \operatorname{sh}[n(h-z)]\} - \frac{ik_0 n \varepsilon^2}{\delta} \operatorname{ch} \gamma \operatorname{sh}[n(h-z)]}{n\Delta} d\lambda \\ &\quad + \frac{i\omega\mu_0 \varepsilon}{\delta} \sin \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \frac{n \operatorname{ch}(nz)}{\Delta} d\lambda, \\ \Pi^* &= \sin \varphi \int_0^\infty J_1(\lambda r) \frac{\Delta_1 \left\{n \operatorname{ch}[n(h-z)] - \frac{ik_0}{\delta} \operatorname{sh}[n(h-z)]\right\} - \frac{ik_0 n \varepsilon^2}{\delta} \operatorname{ch} \gamma \operatorname{ch}[n(h-z)]}{\Delta} d\lambda \\ &\quad + \frac{k_0^2 \varepsilon}{\delta} \cos \varphi \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda r) \operatorname{sh}(nz)}{\Delta} d\lambda,\end{aligned}\quad (16)$$

where

$$\varepsilon = Z_{xx}/Z_0, \quad \Delta = \Delta_1 \Delta_2 - ik_0 n \varepsilon^2 \operatorname{ch}^2(\gamma)/\delta.$$

Below, for solving the problem for the general case, we need expressions for  $\Pi$  and  $\partial \Pi^*/\partial z$  on the upper waveguide wall, which are readily written as

$$\begin{aligned}\Pi &= -i\omega\mu_0 \int_0^\infty A_1^0(\lambda) Z_1(r, \varphi, \lambda) \operatorname{ch} \gamma d\lambda - i\omega\mu_0 \int_0^\infty A_{-1}^0 Z_{-1}(r, \varphi, \lambda) \operatorname{ch} \gamma d\lambda, \\ \frac{\partial \Pi^*}{\partial z} &= \frac{k_0}{\delta} \int_0^\infty B_1^0(\lambda) Z_1(r, \varphi, \lambda) n \operatorname{ch} \gamma d\lambda + \frac{k_0}{\delta} \int_0^\infty B_{-1}^0 Z_{-1}(r, \varphi, \lambda) n \operatorname{ch} \gamma d\lambda,\end{aligned}\quad (17)$$

where



$$A_1^0(\lambda) = -\frac{Q_2(\lambda)}{2\Delta \operatorname{ch} \gamma}, \quad A_{-1}^0(\lambda) = -\frac{Q_4(\lambda)}{2\Delta \operatorname{ch} \gamma}, \quad B_1^0(\lambda) = \frac{Q_1(\lambda)}{2\Delta \operatorname{ch} \gamma}, \quad B_{-1}^0(\lambda) = \frac{Q_3(\lambda)}{2\Delta \operatorname{ch} \gamma},$$

$$Q_1 = \Delta_1 + k_0 \alpha \operatorname{ch} \gamma, \quad Q_3 = \Delta_1 - k_0 \alpha \operatorname{ch} \gamma, \quad Q_2 = -\left(\Delta_2 + \frac{i \alpha n \operatorname{ch} \gamma}{\delta}\right), \quad Q_4 = \Delta_2 - \frac{i \alpha n \operatorname{ch} \gamma}{\delta},$$

$$Z_1(r, \varphi, \lambda) = J_1(\lambda r) \exp(i\varphi), \quad Z_{-1}(r, \varphi, \lambda) = J_{-1}(\lambda r) \exp(-i\varphi).$$

In accordance with the developed approach, the solution of the problem for an arbitrary inclination angle of the constant magnetic field is sought in the form of a sum of two terms one of which is the solution of the problem for the vertical magnetic field, while the other complements the solution such that it satisfies boundary conditions (9)

$$\Pi = \tilde{\Pi}_0 - i\omega\mu_0 \int_0^\infty \operatorname{ch}(nz) d\lambda \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(\lambda r) A_m(\lambda) \exp(im\varphi),$$

$$\Pi^* = \tilde{\Pi}_0^* + \frac{k_0}{\delta} \int_0^\infty \operatorname{sh}(nz) d\lambda \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(\lambda r) B_m(\lambda) \exp(im\varphi). \quad (18)$$

Here,  $A_m(X)$  and  $B_m(X)$  are the unknown functions of the integration constant, which should be determined from boundary conditions (9).

Such form of the general solution is rather convenient because the terms  $\tilde{\Pi}_0$  and  $\tilde{\Pi}_0^*$  (18) satisfy the left-hand sides of boundary conditions (9).

With allowance for the properties of the Bessel functions, we easily show that the action of the operators  $L1$  and  $L2$  (see Eq. (9)) on the fundamental solutions is determined by the expressions

$$L_1 Z_m(r, \varphi) = -\frac{\lambda^2}{2} [Z_{m+2}(r, \varphi) + Z_{m-2}(r, \varphi)],$$

$$L_2 Z_m(r, \varphi) = \frac{i\lambda^2}{2} [Z_{m+2}(r, \varphi) - Z_{m-2}(r, \varphi)], \quad (19)$$

i.e., their action is actually reduced to an increase or decrease in the shift in the fundamental-function index by 2. In addition, we know that

$$\nabla_\perp^2 J_m(r, \varphi) = -\lambda^2 J_m(r, \varphi). \quad (20)$$

Substituting Eq. (19) into Eq. (9) and allowing for Eq. (20), we write the following system of equations with respect to unknown coefficients

$$Q_1 A_m + Q_2 B_m = \alpha A_{m+2} - \beta B_{m+2},$$

$$Q_3 A_m + Q_4 B_m = \alpha A_{m-2} + \beta B_{m-2}, \quad (21)$$

where  $m = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$ ,

$$\alpha = ik_0 \delta_1 \operatorname{ch} \gamma, \quad \beta = \delta_1 n \operatorname{ch}(\gamma) / \delta, \quad \delta_1 = \Delta Z / Z_0.$$

For  $m = \pm 1$ , the right-hand sides of Eqs. (21) should be complemented by the terms  $A^0, A_{-1}^0, B_1^0$  and  $B_{-1}^0$  (see Eq. 17) characterizing the initial field of the source located on the lower wall of the waveguide whose anisotropy is determined by the vertical magnetic field.

Since the initial field is determined by the Bessel functions with indices  $\pm 1$ , the nonzero solutions of system (21) are only the coefficients  $A_m$  and  $B_m$  with odd indices.

Let us increase the index in the second equation (21) by two units and exclude sequentially  $A_m$  and  $B_m$ . Then we obtain two identical recurrence relations

$$pA_{m-2} - qA_m + pA_{m+2} = 0, \quad pB_{m-2} - qB_m + pB_{m+2} = 0, \quad (22)$$

where

$$p = \beta Q_1 - \alpha Q_2 = \beta Q_3 + \alpha Q_4, \quad q = Q_1 Q_4 - Q_2 Q_3 + 2\alpha\beta.$$

The solution of Eq. (22) is written as

$$XB_{m-2} = B_m \psi(X), \quad XA_{m-2} = A_m \psi(X), \quad X = p/q, \quad (23)$$

where the function  $\psi(X)$  can be written in the form of continued fraction:

$$\psi(X) = 1 - \frac{X^2}{1 - \frac{X^2}{1 - \frac{X^2}{\dots}}} \quad (24)$$

Obviously,  $\psi(X)$  is the solution of the quadratic equation

$$\psi^2(X) - \psi(X) + X^2 = 0, \quad \psi(X) = \frac{1 + \sqrt{1 - 4X^2}}{2}, \quad (25)$$

such that the plus sign before the radical is chosen from the condition  $\psi(0) = 1$ , which follows from Eq. (24).

To develop the full solution, we should calculate expansion coefficients (18) with indices  $\pm 1$ . First, for convenience, on the left-hand side of Eq. (21), we move from the coefficients  $A_1, A_{-1}, B_1$  and  $B_{-1}$  to their sums

$$\bar{A}_1 = A_1^0 + A_1, \quad \bar{A}_{-1} = A_{-1}^0 + A_{-1}; \quad \bar{B}_1 = B_1^0 + B_1, \quad \bar{B}_{-1} = B_{-1}^0 + B_{-1}.$$

Making transformations similar to those performed to derivative recurrence relations (22), we obtain four equations with respect to the unknowns with indices  $m = \pm 1$  and  $\pm 3$

$$\begin{aligned} pA_{m-2} - qA_m + pA_{m+2} &= \frac{1}{2 \operatorname{ch} \gamma} [Q_2 \delta_{m,1} - \beta \delta_{m-2,-1} + Q_4 \delta_{m,-1} + \beta \delta_{m+2,1}], \\ pB_{m-2} - qB_m + pB_{m+2} &= \frac{1}{2 \operatorname{ch} \gamma} [-Q_3 \delta_{m,-1} + \alpha \delta_{m+2,1} - Q_1 \delta_{m,1} + \alpha \delta_{m-2,-1}], \end{aligned} \quad (26)$$

where  $\delta_{m,l}$  is the Kronecker delta ( $\delta_{m,l} = 1$  for  $m = l$  and  $\delta_{m,l} = 0$  for  $m \neq l$ ). From Eq. (26), with allowance for Eq. (23), we obtain

$$\begin{aligned} -\psi(X)A_{-1} + XA_1 &= \frac{Q_4 + \beta}{q \operatorname{ch} \gamma}, & -\psi(X)B_{-1} + XB_1 &= \frac{\alpha - Q_3}{q \operatorname{ch} \gamma}, \\ XA_{-1} - \psi(X)A_1 &= \frac{Q_2 - \beta}{q \operatorname{ch} \gamma}, & XB_{-1} - \psi(X)B_1 &= \frac{\alpha - Q_1}{q \operatorname{ch} \gamma}. \end{aligned} \quad (27)$$

Solving Eq. (27), we finally obtain

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(\beta - Q_2)\psi(X) - X(\beta + Q_4)}{q \operatorname{ch} \gamma [\psi^2(X) - X^2]}; & B_1 &= \frac{\psi(X)(Q_1 - \alpha) + X(Q_3 - \alpha)}{q \operatorname{ch} \gamma [\psi^2(X) - X^2]}; \\ A_{-1} &= \frac{(\beta - Q_2)X - \psi(X)(\beta + Q_4)}{q \operatorname{ch} \gamma [\psi^2(X) - X^2]}; & B_{-1} &= \frac{\psi(X)(Q_3 - \alpha) + X(Q_1 - \alpha)}{q \operatorname{ch} \gamma [\psi^2(X) - X^2]}. \end{aligned} \quad (28)$$

To summarize the above consideration, we write the final rigorous expansions for the vertical components of the Hertz vectors on the Earth's surface

$$\begin{aligned} \Pi &= -i\omega\mu_0 \cos \varphi \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda r) \operatorname{sh} \gamma}{n \operatorname{ch} \gamma} d\lambda - i\omega\mu_0 \int_0^\infty A_1(\lambda) d\lambda \sum_{m=0}^\infty J_{2m+1}(\lambda r) \left( \frac{X}{\psi(X)} \right)^m \exp[i(2m+1)\varphi] \\ &\quad + i\omega\mu_0 \int_0^\infty A_{-1}(\lambda) d\lambda \sum_{m=0}^\infty J_{2m+1}(\lambda r) \left( \frac{X}{\psi(X)} \right)^m \exp[-i(2m+1)\varphi], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi^*}{\partial z} &= -\sin \varphi \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda r) \operatorname{sh} \gamma}{\operatorname{ch} \gamma} n d\lambda + \frac{k_0}{\delta} \int_0^\infty B_1(\lambda) d\lambda \sum_{m=0}^\infty J_{2m+1}(\lambda r) \left( \frac{X}{\psi(X)} \right)^m \exp[i(2m+1)\varphi] \\ &\quad - \frac{k_0}{\delta} \int_0^\infty B_{-1}(\lambda) d\lambda \sum_{m=1}^\infty J_{2m+1}(\lambda r) \left( \frac{X}{\psi(X)} \right)^m \exp[-i(2m+1)\varphi]. \end{aligned} \quad (29)$$

Formulas (29) describe the exact solution of the problem of radio-wave propagation in a plane anisotropic waveguide in the impedance formulation.

To avoid misunderstanding, we should note that equation  $\operatorname{ch} \gamma = 0$  in this case does not determine the integrand poles, since we easily see that the first terms in Eq. (29) for  $\gamma = \pm i(2k+1)\pi/2$  are compensated by terms of the series with zero indices.

### 3. Approximate solution

Despite a certain universality, the obtained formulas (29) are cumbersome, which impedes drawing physical conclusions, and are not always convenient for calculation. Therefore, we perform summation of series in these formulas, first, to reduce them to a form convenient for numerical solution and, second, to develop illustrative approximate expressions. Let us perform the summation of the series in Eq. (29).

Denote

$$S_1 = \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m+1}(\lambda r) \exp[i(2m+1)\xi_1], \quad S_2 = \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m+1}(\lambda r) \exp[i(2m+1)\xi_2], \quad (30)$$

where

$$\xi_1 = \frac{1}{2i} \ln \frac{X}{\psi(X)} + \varphi, \quad \xi_2 = \frac{1}{2i} \ln \frac{X}{\psi(X)} - \varphi.$$

The function  $S(t)$  satisfies the linear differential equation

$$S''(z) + S(z) \sin^2 \xi = -\frac{\cos \xi}{2} J_1(z) \quad (31)$$

and the initial conditions  $S(0) = 0$  and  $S'(0) = \exp(i\xi)/2$ . The solution of Eq. (31) satisfying the above initial conditions has the form

$$S(z) = \frac{i}{2} \sin(z \sin \xi) + \frac{\cos \xi}{4} \left[ \exp(iz \sin \xi) \int_0^z \exp(-it \sin \xi) J_0(t) dt + \exp(-iz \sin \xi) \int_0^z \exp(it \sin \xi) J_0(t) dt \right]. \quad (32)$$

Integrals in Eq. (32) belong to the class of incomplete Lipschitz-Hankel integrals [10].

Using the apparatus of incomplete cylindrical functions, we easily obtain a variety of approximate calculation-friendly expressions for  $S(z)$  for all values of parameters of the problem. It is noteworthy that all possible approximations are developed on the basis of consistent rigorous mathematical procedures. Here we confine ourselves to the simplest formula yielding good results when calculating the fields at distances from the source exceeding the ionospheric altitude. We proceed from the following transformation of the Lipschitz-Hankel integral [10]:

$$\int_0^z \exp(iZ \operatorname{ch} \beta) J_0(t) dt = \frac{i}{\operatorname{sh} \beta} + Z \exp(iZ \operatorname{ch} \beta) J_0(Z) - \frac{iZ}{\operatorname{sh} \beta} \left[ J_1(z) \int_{\infty}^{\beta} \exp(iZ \operatorname{ch} u) du + Z J_0(Z) \int_{\infty}^{\beta} \exp(iZ \operatorname{ch} u) \operatorname{sh}^2 u du \right]. \quad (33)$$

For integrals with infinite lower limit, one can integrate by parts to obtain asymptotic expansions. Confining ourselves to the main terms of the expansions, we obtain

$$\int_{\infty}^{\beta} \exp(iZ \operatorname{ch} u) du \sim \frac{\exp(iZ \operatorname{ch} \beta)}{iZ \operatorname{sh} \beta}, \quad \int_{\infty}^{\beta} \exp(iZ \operatorname{ch} u) \operatorname{sh}^2 u du \sim \frac{1}{iZ} \operatorname{sh} \beta \exp(iZ \operatorname{ch} \beta). \quad (34)$$

Transforming Eq. (32) and using Eqs. (33) and (34), we obtain a simple approximate equation for the sum of the studied series:

$$S(Z) = \frac{J_1(Z)}{2 \cos \xi}. \quad (35)$$

Therefore, we finally write

$$S_{1,2} = \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m+1}(\lambda r) \left[ \frac{X}{\psi(X)} \right]^m \exp(\pm i(2m+1)\varphi) = \frac{J_1(z)\psi(X)}{[\psi(X) + X] \cos \varphi \mp i[\psi(X) - X] \sin \varphi}. \quad (36)$$

Omitting elementary algebra accompanying the substitution of Eq. (36) into Eq. (29), we write the final expressions for the vertical components of electric and magnetic Hertz vectors on the Earth surface

$$\begin{aligned} \Pi = -i\omega\mu_0 \cos \varphi \int_0^{\infty} \frac{J_1(\lambda r) \operatorname{sh} \gamma}{n \operatorname{ch} \gamma} d\lambda - 2i\omega\mu_0 \cos \varphi \int_0^{\infty} \frac{J_1(\lambda r) (\Delta_2 + \beta)}{[q + 2p \cos(2\varphi)] \operatorname{ch} \gamma} d\lambda \\ + 2i\omega\mu_0 \frac{\operatorname{ae}}{\delta} \sin \varphi \int_0^{\infty} \frac{J_1(\lambda r) n d\lambda}{q + 2p \cos(2\varphi)}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Pi^*}{\partial z} = -\sin \varphi \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda r) \operatorname{sh} \gamma n \, d\lambda}{\operatorname{ch} \gamma} + \frac{2ik_0}{\delta} \sin \varphi \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda r) (\Delta_1 - \alpha) n \, d\lambda}{q + 2p \cos(2\varphi) \operatorname{ch} \gamma} + \frac{2k_0^2 \alpha}{\delta} \cos \varphi \int_0^\infty \frac{J_1(\lambda r) n \, d\lambda}{q + 2p \cos(2\varphi)}. \quad (37)$$

The corresponding expressions for the source oriented along the  $x$  axis are easily obtained by the replacements  $\cos \varphi \rightarrow -\sin \varphi$  and  $\sin \varphi \rightarrow \cos \varphi$ .

In accordance with the standard procedure, we transform the integrals in Eq. (37) using the formula

$$\int_0^\infty J_1(\lambda r) F(\lambda) \, d\lambda = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{H}_1^{(1)}(\lambda r) F(\lambda) \, d\lambda.$$

Here  $\mathcal{H}_1^{(1)}$  is a Hankel function of the first kind of order one. We easily see that the integrands have the zero-mode pole at the point determined by the equation

$$q + 2p \cos 2\varphi = 0. \quad (38)$$

Assuming that  $|\gamma| = |nh| \ll 1$ , we write

$$\lambda_p = k_0 \sqrt{\frac{\delta - ik_0 h}{\delta - ik_0 h + \delta_1 \cos(2\varphi)}} \sqrt{1 + \frac{i}{k_0 h} \frac{\delta^2 + \alpha^2 - \delta_1^2 - ik_0 h \delta}{\delta - ik_0 h}}. \quad (39)$$

Therefore, in accordance with the theory of residues, we obtain

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{\pi}{2} \frac{\omega \mu_0}{\lambda_p h} \mathcal{H}_1^{(1)}(\lambda_p r) \frac{(\delta + \delta_1 - ik_0 h) \cos \varphi - \alpha \sin \varphi}{\delta - ik_0 h + \delta_1 \cos(2\varphi)}, \\ \frac{\partial \Pi^*}{\partial z} &= -\frac{\pi}{2} \frac{k_0}{\lambda_p h} \mathcal{H}_1^{(1)}(\lambda_p r) \frac{(n_p^2 h - ik_0 \delta - ik_0 \delta_1) \sin \varphi - ik_0^2 \alpha \cos \varphi}{\delta - ik_0 h + \delta_1 \cos(2\varphi)}, \end{aligned} \quad (40)$$

where  $n_p = \sqrt{\lambda_p^2 + k_0^2}$ . Expressions (40) describe the zero-mode propagation in a plane anisotropic waveguide and hold true for  $r > h$ .

Let us write without derivation the solution of the problem for the case where the source is a vertical electric dipole with the current moment  $I$ .

The exact formulas on the Earth's surface ( $z=0$ ) have the form

$$\begin{aligned} \Pi &= \int_0^\infty J_0(\lambda r) \operatorname{tg} \gamma \frac{\lambda \, d\lambda}{n} + \int_0^\infty \frac{\beta J_0(\lambda r) \lambda \, d\lambda}{p d \gamma} \\ &\quad + 2 \int_0^\infty \frac{\psi(X) (2\Delta_2 X - \beta) \lambda \, d\lambda}{\psi^2(X) - X^2} \sum_{m=0}^\infty \varepsilon_m J_{2m}(\lambda r) \left( \frac{X}{\psi(X)} \right)^m \cos(2m\varphi), \\ \frac{\partial \Pi^*}{\partial z} &= \frac{4i\omega \varepsilon_0}{\delta} \left[ \alpha \int_0^\infty \frac{n\psi(X) \lambda \, d\lambda}{q(\psi^2 - X^2)} \sum_{m=0}^\infty \varepsilon_m \left( \frac{X}{\psi(X)} \right)^m J_{2m}(\lambda r) \cos(2m\varphi) \right. \\ &\quad \left. - \delta_1 \int_0^\infty \frac{n\lambda \, d\lambda}{p} \sum_{m=1}^\infty \left( \frac{X}{\psi(X)} \right)^m J_{2m}(\lambda r) \sin(2m\varphi) \right], \end{aligned} \quad (41)$$

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 1/2, & m = 0; \\ 0, & m \neq 0. \end{cases}$$

The approximate formulas obtained after the summation of series have the form

$$\Pi = \frac{\pi i}{2h} \mathcal{H}_0^{(1)}(\lambda_p r), \quad \frac{\partial \Pi^*}{\partial z} = -\frac{\pi \omega \varepsilon_0}{2} \frac{\mathcal{H}_0^{(1)}(\lambda_p r)}{h} \frac{\alpha + 2\delta_1 \sin(2\varphi)}{\delta - ik_0 h + \delta_1 \cos(2\varphi)}. \quad (42)$$

In the above formulas, the multiplier  $i(I)/(2\pi \varepsilon_0 \omega)$  is omitted and  $\mathcal{H}_0^{(1)}$  is a Hankel function of the first kind of order zero.

Assuming that  $\delta_I = 0$  and  $\chi = 0$  in Eqs. (40) and (42), we arrive at the cases of normal magnetic field and isotropic waveguide, respectively. The obtained expressions are natural generalization of the previously known simplified solutions.

#### 4. Conclusions

In this paper, we obtained the exact and approximate solutions of the problem on electromagnetic-wave excitation in a plane waveguide with anisotropic upper wall.

The case of an oblique magnetic field is considered. Although the solution of such a standard problem itself is of interest, our efforts were aimed at developing the theory for explaining the results of experimental studies of the ULF fields generated by lightning discharges [5, 6] and by power transmission lines grounded at the ends [11]. Recent years saw regular measurements of the background natural ULF fields in the low latitudes (for example, the Crete Island [12]) in which it is essential to allow for the magnetic-field inclination.

In this paper, we confined ourselves to the presentation of a formal procedure for obtaining solutions. Particular examples of calculating the ULF field spectra and polarization will be given in our future works on the experimental data interpretation.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project Nos. 01-02-16742 and 04-02-17333), the programs "Universities of Russia" (grant No. 015-01.01.069), the Ministry of Higher Education (grant No. E02-8.0-33), INTAS (grant No. 99-0335), and the Federal Program of the Ministry of Science (contract No. 40.020.1.1.1171).

#### References

1. J.R. Wait, *Electromagnetic Waves in Stratified Media*, Pergamon Press, New York (1972).
2. J. Galeys, *Terrestrial Propagation of Ling Electromagnetic Waves*, Pergamon Press, New York (1972).
3. G.I.Makarov, V.V.Novikov, and S.T.Rybachek, *Propagation of Electromagnetic Waves above the Earth's Surface [in Russian]*, Nauka, Moscow (1991).
4. G.I. Makarov, V. V. Novikov, and S. T. Rybachek, *Propagation of Electromagnetic Waves in the Waveguiding Channel "Earth-Ionosphere" and in the Ionosphere [in Russian]*, Nauka, Moscow (1993), p. 152.
5. P. P. Belyaev, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Yu. Trakhtengerts, *Radiophys. Quantum Electron.*, 32, No. 7, 594 (1989).
6. P. P. Belyaev, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Yu. Trakhtengerts, *Radiophys. Quantum Electron.*, 32, No. 6, 491 (1989).
7. V. V. Kirillov, *Radiophys. Quantum Electron.*, 39, 737 (1996).
8. V. V. Kirillov, V. N. Kopeykin, and V.K.Mushtak, *Geomagn. Aeron.*, 37, No. 3, 341 (1997).
9. J. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill (1941).
10. M. N. Agrest and M. Z. Maksimov, *Theory of Incomplete Cylindrical Functions and their Use [in Russian]*, Atomizdat, Moscow (1965).
11. P. P. Belyaev, S.V. Polyakov, E. N. Ermakova, et al., *Radiophys. Quantum Electron.*, 45, No. 2, 135. (2002).
12. T. Bosinger, C.Haldoupis, P.P. Belyaev, et al., *J. Geophys. Res. A*, 107, No. 10, 1281 (2002).

---

**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. Кол. Научн. Центра, 2006. С. 7-23.**

Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия, [anshev2009-01@rambler.ru](mailto:anshev2009-01@rambler.ru)

#### Введение

Задача определения электропроводности глубинных областей земной коры неизбежно приводит к необходимости использовать в методе частотного зондирования измерительные установки с все большими расстояниями между излучателем поля и точкой наблюдения. Наличие естественных и промышленных шумов стимулирует как развитие аналоговой шумоподавляющей аппаратуры и алгоритмов цифровой фильтрации, так и поиск более мощных средств возбуждения поля. При этом особую актуальность имеют способы возбуждения мощного монохроматического гармонического электромагнитного поля, позволяющие упростить задачу выделения полезного сигнала на фоне случайных помех. Для решения этой проблемы, как правило, применяются системы излучателей, имеющие большой электрический или магнитный (в зависимости от типа источника) момент. С этой точки зрения применение протяженных участков промышленных линий электропередачи (ЛЭП), заземляемых на оконечных подстанциях имеет неплохие перспективы.

Поскольку компоненты электромагнитного поля излучателя пропорциональны электрическому моменту  $J = Il$ , то амплитуду полезного сигнала можно увеличить как путем увеличения амплитуды тока  $I$  в источнике, так и увеличивая линейные размеры излучателя  $l$ . Использование протяженных участков ЛЭП позволяет, в принципе, получать излучатели с линейными размерами в сотни километров без значительных дополнительных затрат. С другой стороны компоненты поля пропорциональны удельному сопротивлению подстилающего полупространства, поэтому излучатель должен находиться в пределах достаточно однородных высокоомных блоков земной коры, что накладывает некоторые ограничения на выбор того или иного участка ЛЭП. Кроме того, протяженные участки ЛЭП могут иметь довольно сложную конфигурацию, то есть их можно считать прямолинейными лишь в первом приближении. При расстояниях между точкой наблюдений и геометрическим центром излучающей системы, сопоставимых с размерами излучателя, при интерпретации нужно учитывать геометрию излучающей системы, а при удалениях, превышающих высоту нижней границы проводящей ионосферы, возникает необходимость учета и свойств верхнего полупространства. Далее, если расстояние  $r$  от точки наблюдений до элемента источника превышает длину волны в воздухе  $\lambda_0$  ( $r/\lambda_0 \gg 1$ ), мы выходим за пределы применения квазистационарного приближения, широко используемого в низкочастотных электромагнитных методах исследования, и, следовательно, возникает необходимость учета действия максвелловского тока смещения [Уэйт, 1987, Жамалетдинов и др., 1999]. Ниже мы рассмотрим некоторые вопросы представления и интерпретации результатов измерений с использованием протяженных участков ЛЭП в качестве излучающих систем. С целью некоторого упрощения, мы будем предполагать, что расстояние  $r$  от точки наблюдений до любой точки источника не превышает пределов, диктуемых плоским приближением модели Земли:  $r/R \ll 1$ , где  $R$  – радиус Земли. При этом излучающую систему будем представлять в виде плоского контура, лежащего на поверхности Земли.

Проблемы возникают уже на стадии представления результатов наблюдения в виде кривых кажущегося сопротивления. При достаточно сложной конфигурации участка ЛЭП используемого в качестве излучателя приходится вместо общепринятых систем координат связанных с источником, которые обычно применяются для представления компонент поля источников дипольного типа, использовать локальные системы координат, с началом отсчета в точке измерения, которые учитывают геометрию расположения датчиков поля (измерительных электрических линий и магнитных датчиков). Тесно связанные между собой понятия кажущегося сопротивления и геометрических коэффициентов для измеряемых компонент поля нуждаются в некотором обобщении для сохранения их физического смысла. При переходе к локальным системам отсчета необходимо учитывать фазовые сдвиги, как между самими наблюдаемыми компонентами поля, так и между ними и током в источнике. При этом сама величина силы тока в протяженном излучателе, оказывается функцией, зависящей от расстояния до генератора вдоль длины линии [Вешев, 1980], что так же нужно учитывать при исследовании амплитудно-фазовых соотношений наблюдаемых компонент поля и их представлении в виде кривых частотного зондирования. Ввиду большого количества наблюдаемых компонент поля (как правило, не меньше 5 –  $B_x, B_y, B_z, E_x, E_y$ ) и их зависимости от той или иной системы координат возникает проблема выбора инвариантных характеристик поля, которые можно использовать для определения понятия кажущегося сопротивления или функций отклика среды пригодных для интерпретации. В этом отношении очень удобным оказывается подход, используемый в магнитотеллурике, где свойства источника практически не учитываются, а в качестве измеряемых величин выступают компоненты тензора импеданса на поверхности Земли. При таком подходе мы избегаемся и от проблемы учета свойств верхнего полупространства (атмосферы и ионосферы) в силу граничных условий Леонтовича. Однако в этом случае мы оказываемся в достаточно тесных рамках условия дальней зоны ( $r/\lambda \gg 1$ ), где  $\lambda$  – длина волны в Земле, когда импеданс оказывается связанным простым соотношением с удельным сопротивлением подстилающего полупространства. Другой способ это введение эффективного удельного сопротивления по компонентам поля, учитывающего геометрию измерительной установки и источника поля, а также частотную зависимость компонент нормального поля [Вешев, 1980, Caldwell, Bibby, Brown, 2002].

## 1. Электромагнитное поле длинной линии произвольной конфигурации заземленной на концах с неоднородным распределением тока.

### 1.1. Распределение тока вдоль длинной линии, заземленной на концах.

Основными характеристиками длинной линии являются погонные параметры – активное сопротивление жил провода  $R$ , проводимость  $G$  гальванических утечек, индуктивность  $L$  и емкость  $C$  (рис. 1). Детальный анализ электромагнитных параметров длинных линий используемых в геоэлектрике представлен в работе [Вешев, 1980]. Параметры промышленных ЛЭП типа воздушных линий с расщепленными проводами можно найти в ряде технических справочников. Для них тоже можно вводить приближенные эквивалентные

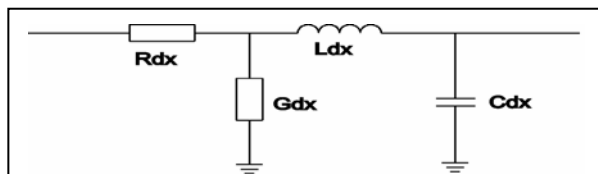


Рис. 1. Погонные параметры и эквивалентная схема элементарного участка однородной линии – к выводу уравнений (1).

погонные характеристики, аналогичные однопроводным геофизическим линиям. Поэтому далее ограничимся рассмотрением длинных однопроводных линий. Для простоты будем считать линию однородной, то есть параметры распределены равномерно по всей длине линии и являются не зависящими от координат постоянными величинами, характеризующими линию. Ток и напряжение для элемента такой линии длиной  $dx$  удовлетворяют системе телеграфных уравнений

$$\begin{aligned}\frac{dU(x,t)}{dx} &= I(x,t)R + L\frac{dI(x,t)}{dt} \\ \frac{dI(x,t)}{dx} &= U(x,t)G + C\frac{dU(x,t)}{dt}\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $G$  – значения погонных величин – индуктивности, емкости, сопротивления и проводимости изоляции кабеля (рис. 1).

Технически, при использовании ЛЭП, более удобной оказывается несимметричная схема включения линии – генератор располагается возле одного из заземлений [Вешев, 1980].

Если на входе такой линии действует гармонический сигнал с временной зависимостью типа  $\exp(i\omega t)$ , то система уравнений (1) сводится к двум уравнениям второго порядка для комплексных амплитуд напряжения и тока:

$$\begin{aligned}\frac{d^2U(x,\omega)}{dx^2} &= Z_0(\omega)Y_0(\omega)U(x,\omega) \\ \frac{d^2I(x,\omega)}{dx^2} &= Z_0(\omega)Y_0(\omega)I(x,\omega)\end{aligned},\quad (2)$$

где  $Z_0(\omega) = R + i\omega L$   $Y_0(\omega) = G + i\omega C$

Решения этих уравнений представляются функциями  
 $U(x,\omega) = A(\omega)\exp(\gamma(\omega)x) + B(\omega)\exp(-\gamma(\omega)x)$

$$I(x,\omega) = \frac{A(\omega)\exp(\gamma(\omega)x) - B(\omega)\exp(-\gamma(\omega)x)}{W(\omega)}\quad (3)$$

Здесь  $A(\omega)$  и  $B(\omega)$  – функции частоты, определяемые граничными условиями на концах линии, а величины  $\gamma(\omega)$  и  $W(\omega)$ , представляют, соответственно, коэффициент распространения и волновое сопротивление линии для данной частоты  $\omega$ :

$$\gamma(\omega) = \sqrt{Z_0(\omega)Y_0(\omega)} \quad W(\omega) = \sqrt{\frac{Z_0(\omega)}{Y_0(\omega)}}\quad (4)$$

Если известны значения тока и напряжения на конце линии  $U_f(\omega)$  и  $I_f(\omega)$ , то в любом поперечном сечении на удалении  $x$  вдоль контура линии напряжение и ток определяются выражениями

$$\begin{aligned}U(x,\omega) &= U_f(\omega)ch(\gamma(\omega)(l-x)) + I_f(\omega)W(\omega)sh(\gamma(\omega)(l-x)) \\ I(x,\omega) &= U_f(\omega)W(\omega)^{-1}sh(\gamma(\omega)(l-x)) + I_f(\omega)ch(\gamma(\omega)(l-x))\end{aligned}\quad (5)$$

где  $l$  – длина линии.

Если на конце линии включена нагрузка с импедансом  $Z(\omega)$ , то входной импеданс линии определяется выражением

$$Z_{in}(\omega) = W(\omega)\frac{Z(\omega) + W(\omega)th(\gamma(\omega)l)}{W(\omega) + Z(\omega)th(\gamma(\omega)l)}.\quad (6)$$

При этом значения тока и напряжения на конце линии  $U_f(\omega)$  и  $I_f(\omega)$  связаны через импеданс нагрузки

$$Z(\omega) = \frac{U_f(\omega)}{I_f(\omega)} = \frac{U(l,\omega)}{I(l,\omega)}.\quad (7)$$

На входе линии, аналогично,

$$Z_{in}(\omega) = \frac{U_0(\omega)}{I_0(\omega)} = \frac{U(0,\omega)}{I(0,\omega)}.\quad (8)$$

Положим, что напряжение и ток в линии меняется по закону (5). Примем, что зависимости параметров линии от циклической частоты  $\omega$  колебаний напряжения генератора известны – коэффициент распространения  $\gamma = \gamma(\omega)$  и волновое сопротивление  $W = W(\omega)$ . Практически измеряются значения напряжения  $U_0(\omega)$  и тока  $I_0(\omega)$  у генератора, значения  $U_f(\omega)$  и  $I_f(\omega)$  в конце линии определим по волновому сопротивлению  $W(\omega)$ , коэффициенту распространения  $\gamma(\omega)$  и длине линии  $l$ . Из (5) следует, что

$$\begin{pmatrix} U_f(\omega) \\ I_f(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch(\gamma(\omega) \cdot l) & W(\omega) \cdot sh(\gamma(\omega) \cdot l) \\ W(\omega)^{-1} \cdot sh(\gamma(\omega) \cdot l) & ch(\gamma(\omega) \cdot l) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} U_0(\omega) \\ I_0(\omega) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Погонные параметры ЛЭП над однородным полупространством можно приближенно оценить по следующим формулам: индуктивность (Вешев, 1980) –

$$L(h, r_0, \omega, \sigma) = \left[ 2 \left( \ln \left( \frac{1.123}{|k(\omega, \sigma) r_0|} \right) - 1 \right) - i(1.5708 + 2.6667 |k(\omega, \sigma) h|) \right] \cdot 10^{-7} \text{ (Гн/м)}, \quad (10)$$

$$\text{где } k(\omega, \sigma) = \sqrt{i \omega \mu_0 \sigma} \quad (11)$$

– волновое число подстилающего полупространства,  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота,  $\sigma = 1/\rho$  – удельная электропроводность, а  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость подстилающего полупространства.

$r_0 = 5$  м – эквивалентный радиус линии электропередачи учитывающий расстояние между фазами и расщепленность проводов,  $h = 15$  м – высота проводов над землей, емкость

$$C(h, r_0) = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r_0}\right)} \text{ (Ф/м)}, \quad (12)$$

здесь  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, – диэлектрическая проницаемость воздуха.

Сопротивление найдем, учитывая  $K$  – коэффициент заполнения сечения провода активным материалом – алюминием (Александров, 1989) и число параллельно включенных проводов  $n$

$$R(\rho_0, r, \kappa, n) = \frac{\rho_0}{\pi r^2 \cdot \kappa \cdot n} \text{ (Ом/м)} \quad (13)$$

Здесь,  $r$  – радиус провода ( $r = l - 1.5$  см),  $\rho_0 = 2.66 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – удельное сопротивление алюминия,  $\kappa = 0.66 - 0.67$  коэффициент заполнения сечения провода алюминием,  $n = 6$  число проводов в ЛЭП. Проводимостью воздуха и изоляторов ЛЭП пренебрегаем  $G=0$  См.

Оценки (9) – (13) были проверены в ходе экспериментов по частотному зондированию с ЛЭП-401 (Кола – Серебрянка) протяженностью 127 км в субширотном направлении на севере Кольского полуострова.

На рис. 2 показано сравнение измеренных значений и теоретических оценок индуктивности ЛЭП в зависимости от частоты для разных значений электропроводности подстилающего полупространства. Теоретические кривые рассчитаны для удельного сопротивления подстилающего полупространства  $\rho = 1/\sigma$  от  $7.5 \cdot 10^3$  до  $3 \cdot 10^4$  Ом·м в диапазоне частот от 2.6 до 166.7 Гц.

Для значения  $\rho = 1.5 \cdot 10^4$  Ом·м удельного сопротивления подстилающего

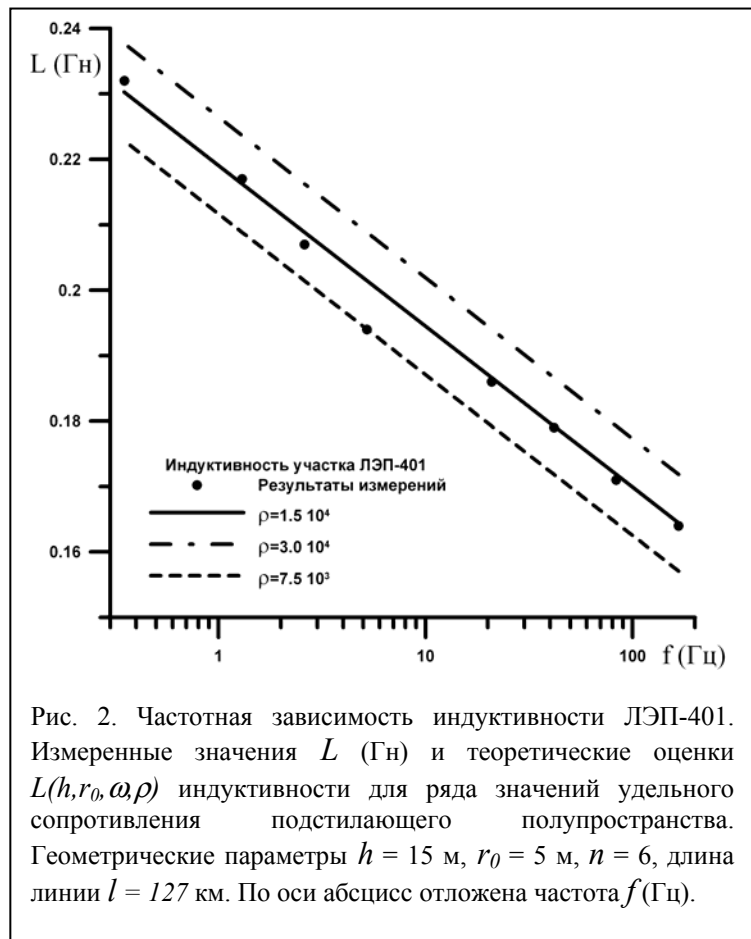


Рис. 2. Частотная зависимость индуктивности ЛЭП-401. Измеренные значения  $L$  (Гн) и теоретические оценки  $L(h, r_0, \omega, \rho)$  индуктивности для ряда значений удельного сопротивления подстилающего полупространства. Геометрические параметры  $h = 15$  м,  $r_0 = 5$  м,  $n = 6$ , длина линии  $l = 127$  км. По оси абсцисс отложена частота  $f$  (Гц).



полупространства относительное отклонение теоретических оценок от измеренных значений индуктивности не превышает 2%, что неплохо согласуется с данными частотного зондирования и зондирования на постоянном токе для верхней части геоэлектрического разреза Мурманского блока. [Жамалетдинов и др., 1999]

С изменением частоты напряжения генератора распределение тока в линии будет меняться, согласно (5), как показано на рис. 3.

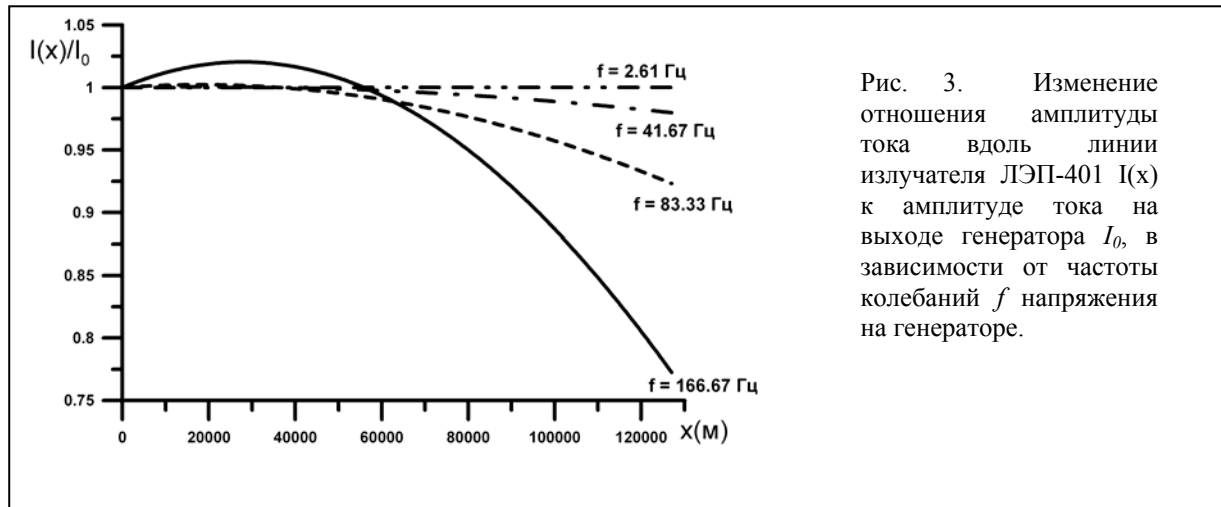


Рис. 3. Изменение отношения амплитуды тока вдоль линии излучателя ЛЭП-401  $I(x)$  к амплитуде тока на выходе генератора  $I_0$ , в зависимости от частоты колебаний  $f$  напряжения на генераторе.

Частотная зависимость относительного максимального изменения амплитуды тока от ее среднего значения может быть представлена величиной

$$d(f) = \frac{\Delta I}{I_m} \cdot 100\% \quad (14)$$

Здесь  $\Delta I = I_{max} - I_{min}$  – максимальное изменение,  $I_m$  среднее арифметическое абсолютного значения амплитуды тока вдоль линии на частоте  $f$ . Величина  $d$  характеризует неоднородность распределения тока вдоль линии на данной частоте.

Из рис. 3 следует, что для ЛЭП-401 в случае низкой частоты (2.6 Гц) значение амплитуды тока вдоль длины линии практически не меняется. На высокой частоте (166.7 Гц) относительное изменение составляет заметную величину в 28% и должно учитываться при вычислении компонент поля.

### 1.2. Кажущееся сопротивление для компонент поля длинной линии, заземленной на концах.

Рассмотрим гармонически изменяющееся во времени поле длинной линии с неоднородным распределением тока (5). Контур линии зададим параметрическими зависимостями декартовых координат

$$\begin{cases} x = x(s) \\ y = y(s) \end{cases}, \quad (15)$$

где  $s$  – длина пути вдоль контура линии от генератора. То есть, любая точка, принадлежащая контуру линии, определяется радиус-вектором  $\mathbf{r}(s) = (x(s) \ y(s))^T$ .

Будем считать, что в точке наблюдений  $\mathbf{P} = (x_p \ y_p)^T$  измеряются ортогональные компоненты поля вдоль ортов  $\mathbf{p}^{<m>}$ ,  $m = 0, 1$ . Рассмотрим поле над однородным полупространством с удельной электропроводностью  $\sigma$ . Электрические компоненты поля источника определяются интегрированием поля горизонтального электрического диполя вдоль контура линии

$$E_m(\omega, \mathbf{P}) = \int_0^l \mathbf{R}(\alpha(s, \mathbf{x}^{<0>}))^T \mathbf{E}_{HED}(I(s, \omega), \omega, |\mathbf{r}(s) - \mathbf{P}|, \theta(s, \mathbf{P}), \sigma) \cdot \mathbf{p}^{<m>} ds. \quad (16)$$

Здесь  $\mathbf{E}_{HED}(I(s, \omega), \omega, |\mathbf{r}(s) - \mathbf{P}|, \theta(s, \mathbf{P}), \sigma)$  – электрическое поле диполя единичной длины в локальной системе координат с ортами направленными по касательной и нормали к контуру линии.

$$\mathbf{E}_{HED}(I, \omega, r, \theta, \sigma) = \frac{I}{2\pi\sigma \cdot r^3} \begin{pmatrix} 3 \cos(\theta)^2 - 2 + \exp(i\xi(\omega, \sigma, r))(1 - i\xi(\omega, \sigma, r)) \\ 3 \cos(\theta) \sin(\theta) \end{pmatrix} \quad (17)$$

$I$  – ток в диполе,  $r = |\mathbf{r}(s)|$  – расстояние от центра диполя до точки измерения поля,  $\theta$  – угол между направлением оси диполя и направлением из центра диполя на точку измерения.

$$\xi(\omega, \sigma, r) = k(\omega, \sigma) \cdot r \quad (18)$$

Матрица поворота  $\mathbf{R}(\alpha)$  преобразует компоненты вектора электрического поля при переходе из локальной системы координат в систему координат с осями, повернутыми на угол  $\alpha$

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (19)$$

Угол  $\alpha(s, \mathbf{x}^{<0>})$  – угол между единичным вектором  $\mathbf{t}(s) = r'(s)$ , направленным по касательной к контуру в точке  $\mathbf{r}(s)$  и ортом  $\mathbf{x}^{<0>}$ , направленным по оси  $x$ :

$$\alpha(s, \mathbf{x}^{<0>}) = \arccos(\mathbf{t}(s) \cdot \mathbf{x}^{<0>}). \quad (20)$$

Для горизонтальных компонент магнитного поля аналогично

$$H_m(\omega, \mathbf{P}) = \int_0^l \mathbf{R}(\alpha(s, \mathbf{x}^{<0>}))^T \mathbf{H}_{HED}(I(s, \omega), \omega, |\mathbf{r}(s) - \mathbf{P}|, \theta(s, \mathbf{P}), \sigma) \cdot \mathbf{p}^{<m>} ds, \quad (21)$$

Здесь  $\mathbf{H}_{HED}(I(s, \omega), \omega, |\mathbf{r}(s) - \mathbf{P}|, \theta(s, \mathbf{P}), \sigma)$  – вектор горизонтальной проекции магнитного поля электрического диполя единичной длины в локальной системе координат с осями направленными по касательной и нормали к контуру линии.

$$\mathbf{H}_{HED}(I, \omega, r, \theta, \sigma) = i \frac{I}{4 \cdot r^2} \begin{pmatrix} \cos(\theta) \sin(\theta) \zeta(\omega, \sigma, r) (J_1 H_2 + J_2 H_1) \\ \sin(\theta)^2 \zeta(\omega, \sigma, r) (J_1 H_2 + J_2 H_1) - J_1 H_1 \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где  $J_j = J_j(\zeta)$ ,  $H_j = H_j(\zeta)$ ,  $j=1, 2$  – функции Бесселя и Ханкеля комплексного аргумента  $\zeta(\omega, \sigma, r) = \xi(\omega, \sigma, r) / 2$

В дальней зоне (при достаточно больших частотах или высоких значениях проводимости – если выполняется условие  $|\xi(\omega, \sigma, |\mathbf{P} - \mathbf{r}(s)|)| \gg 1$  для любого значения  $s \in [0, l]$ )

$$\mathbf{E}_{HED\omega}(I, r, \theta, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{I}{r^3} \begin{pmatrix} 3 \cos(\theta)^2 - 2 \\ 3 \cos(\theta) \sin(\theta) \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{H}_{HED\omega}(I, \omega, r, \theta, \sigma) = \frac{(1+i)}{2\pi\sqrt{2\sigma\omega\mu}} \cdot \frac{I}{r^3} \begin{pmatrix} 3 \cos(\theta) \sin(\theta) \\ 2 - 3 \cos(\theta)^2 \end{pmatrix} \quad (25)$$

В случае ближней зоны (постоянный ток, высокое сопротивление), если выполняется условие  $|\xi(\omega, \sigma, |\mathbf{P} - \mathbf{r}(s)|)| \ll 1$  для любого значения  $s \in [0, l]$ , электрическое поле сохраняет свою зависимость от проводимости подстилающего полупространства

$$\mathbf{E}_{HEDk}(I, r, \theta, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{I}{r^3} \begin{pmatrix} 3 \cos(\theta)^2 - 1 \\ 3 \cos(\theta) \sin(\theta) \end{pmatrix}, \quad (26)$$

а магнитное поле теряет эту связь, и определяется только геометрией установки и током источника

$$\mathbf{H}_{HEDk}(I, r, \theta, \sigma) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^2} \begin{pmatrix} 2 \cos(\theta) \sin(\theta) \\ 2 \sin(\theta)^2 - 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

При интегрировании выражений (25) – (27) ток удобно представить в виде  $I(s, \omega) = I_0 \cdot c(s, \omega)$ . Здесь  $I_0 = |I(\omega, 0)|$  представляет амплитуду измеряемого тока на выходе генератора. При этом для измеряемых компонент поля вдоль ортов  $\mathbf{p}^{<m>}$  можно ввести кажущееся сопротивление, аналогично тому, как это делается в случае дипольного излучателя.

$$\text{По электрическому полю в дальней зоне} - \rho_{\omega m}^E(\omega, \mathbf{P}) = \left| \frac{E_m}{I_0} K_{\omega m}^E \right|, \quad (28)$$

где геометрические коэффициенты для компонент электрического поля дипольного источника длиной  $ds$  с центром в точке  $\mathbf{r}(s_0)$ :

$$K_{\omega m}^{Ed} = (\mathbf{R}(\alpha(s_0, \mathbf{x}^{<0>})))^T \mathbf{E}_{HED\omega}(1, |\mathbf{r}(s_0) - \mathbf{P}|, \theta(s_0, \mathbf{P}), 1) \cdot \mathbf{p}^{<m>} ds)^{-1} \quad (29)$$

для длинной линии, интегрируя (16) вдоль контура излучателя с учетом распределения тока в нем, имеем

$$K_{\omega m}^E = \left( \int_0^l \mathbf{R}(\alpha(s, \mathbf{x}^{<0>}))^T \mathbf{E}_{HED\omega}(c(s, \omega), |\mathbf{r}(s) - \mathbf{P}|, \theta(s, \mathbf{P}), 1) \cdot \mathbf{p}^{<m>} ds \right)^{-1} \quad (30)$$

По горизонтальным компонентам магнитного поля в дальней зоне

$$\rho_{\omega m}^H(\omega, \mathbf{P}) = \left| \omega \mu \left( \frac{H_m}{I_0} \right)^2 K_{\omega m}^H \right|, \quad (31)$$

где геометрические коэффициенты для горизонтальных компонент магнитного поля дипольного источника длиной  $ds$  с центром в точке  $\mathbf{r}(s_0)$ :

$$K_{\omega m}^{Hd} = \left( \mathbf{R}(\alpha(s_0, \mathbf{x}^{<0>}))^T \mathbf{H}_{HED\omega}(1, |\mathbf{r}(s_0) - \mathbf{P}|, \theta(s_0, \mathbf{P}), 1) \cdot \mathbf{p}^{<m>} ds \right)^{-1} \quad (32)$$

для длинной линии, интегрируя (21) вдоль контура излучателя с учетом распределения тока в нем, имеем

$$K_{\omega m}^H = \left( \int_0^l \mathbf{R}(\alpha(s, \mathbf{x}^{<0>}))^T \mathbf{H}_{HED\omega}(c(s, \omega), \omega, |\mathbf{r}(s) - \mathbf{P}|, \theta(s, \mathbf{P}), 1) \cdot \mathbf{p}^{<m>} ds \right)^{-2} \quad (33)$$

В случае однородного полупространства в дальней зоне значения кажущегося сопротивления, определяемые выражениями (28) и (31) стремятся к значению удельного сопротивления подстилающей среды.

Из (16) и (26) следует, что в ближней зоне (для постоянного тока) по электрическому полю, так же можно ввести кажущееся сопротивление подобно (28)

$$\rho_{k m}^E(\omega, \mathbf{P}) = \left| \frac{E_m}{I_0} K_{k m}^E \right|, \quad (34)$$

при этом геометрические коэффициенты для компонент электрического поля определяются аналогично (30)

$$K_{k m}^E = \left( \int_0^l \mathbf{R}(\alpha(s, \mathbf{x}^{<0>}))^T \mathbf{E}_{HEDk}(c(s, \omega), |\mathbf{r}(s) - \mathbf{P}|, \theta(s, \mathbf{P}), 1) \cdot \mathbf{p}^{<m>} ds \right)^{-1} \quad (35)$$

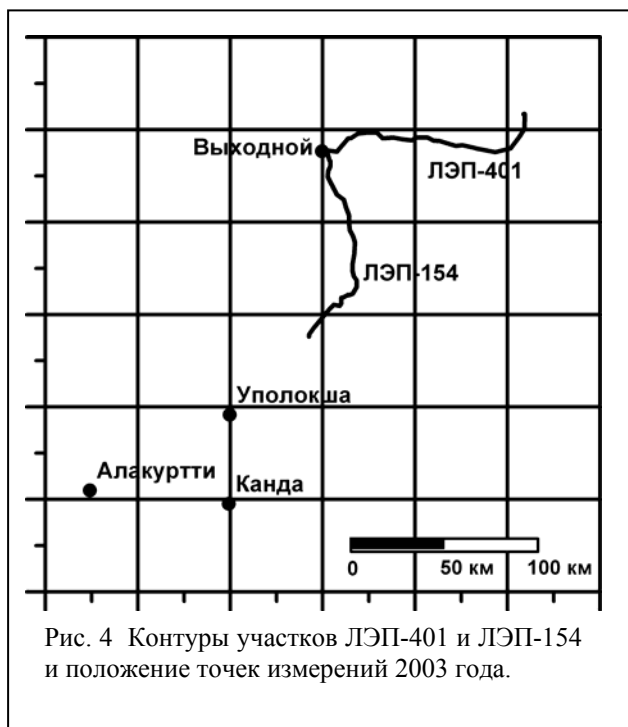


Рис. 4 Контурь участков ЛЭП-401 и ЛЭП-154 и положение точек измерений 2003 года.

Тесно связанные между собой понятия кажущегося сопротивления и геометрических коэффициентов для измеряемых компонент поля нуждаются, как видно из (28–35), в некотором обобщении для сохранения их физического смысла. А именно, при компонентных измерениях поля длинной линии, для представления результатов в виде кривых кажущегося сопротивления в области высоких частот необходимо учитывать как геометрию контура излучателя, так и неоднородность распределения тока в нем.

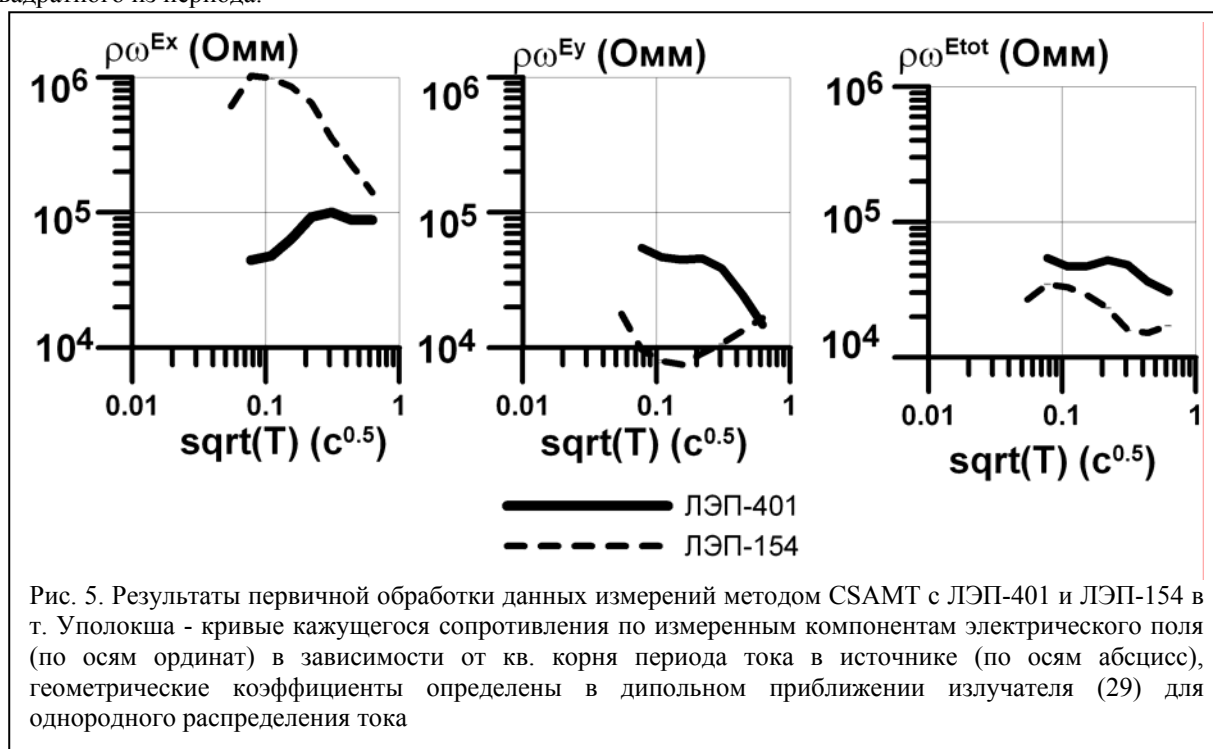
В качестве практического примера рассмотрим результаты измерений по методике CSAMT с использованием участков ЛЭП-401 (Кола–Серебрянка) в субширотном направлении и ЛЭП-154 (Кола–Мончегорск) в субмеридиональном направлении на Кольском полуострове в качестве излучателей (рис. 4). Генератор был установлен в месте пересечения обеих линий электропередачи на подстанции в пункте Выходной, заземление которой служило центральным заземлением питающих диполей.

Ниже представлены результаты первичной обработки в точке Уполокша (рис. 5, 6).

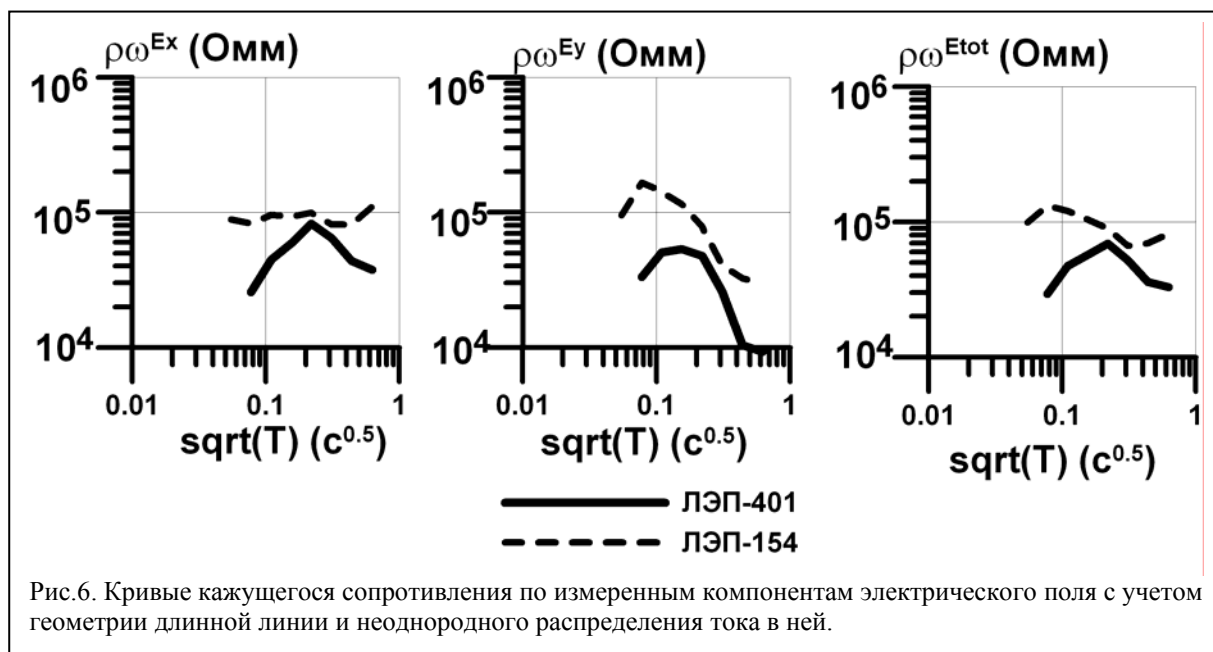
Значительное расхождение кривых кажущегося сопротивления для разных излучателей на рис. 5 объясняется применением геометрических коэффициентов для дипольного источника, а не для длинной линии. Кроме того, при этом не учитывалось неоднородное распределение тока в излучателе. При учете этих факторов с помощью (30) компонентные кривые кажущегося сопротивления по электрическому полю для разных излучателей становятся более согласованными по уровню и по форме (рис. 6).

Таким образом, при достаточно сложной конфигурации участка ЛЭП используемого в качестве излучателя приходится вместо общепринятых систем координат связанных с источником, которые обычно применяются для представления компонент поля источников дипольного типа, вводить в рассмотрение локальные системы координат, с началом отсчета в точке измерения, которые учитывают геометрию

расположения датчиков поля. Полученные таким образом кривые кажущегося сопротивления для разных участков ЛЭП оказываются более согласованными (рис. 6) и по величине и по форме зависимости от корня квадратного из периода.



Глядя на рис. 6 можно сделать вывод о существенной анизотропии сопротивления подстилающего пространства. Для всех компонент поля кажущееся сопротивление от линии в субширотном направлении меньше чем от линии вдоль меридиана. Согласно парадоксу анизотропии, этот факт можно формально трактовать как анизотропию подстилающей среды с более высоким сопротивлением в широтном направлении и более низким вдоль меридиана.



Более правдоподобным объяснением результатов, представленных на рис. 6, является, видимо, существенное отличие геоэлектрических разрезов под участками питающих линий и наличие горизонтальной неоднородности подстилающего полупространства в точке Уполокша.

## 2. Инверсия данных измерений поля длинной линии произвольной конфигурации заземленной на концах неоднородным распределением тока методом эффективной линеаризации.

### 2.1. Метод эффективной линеаризации.

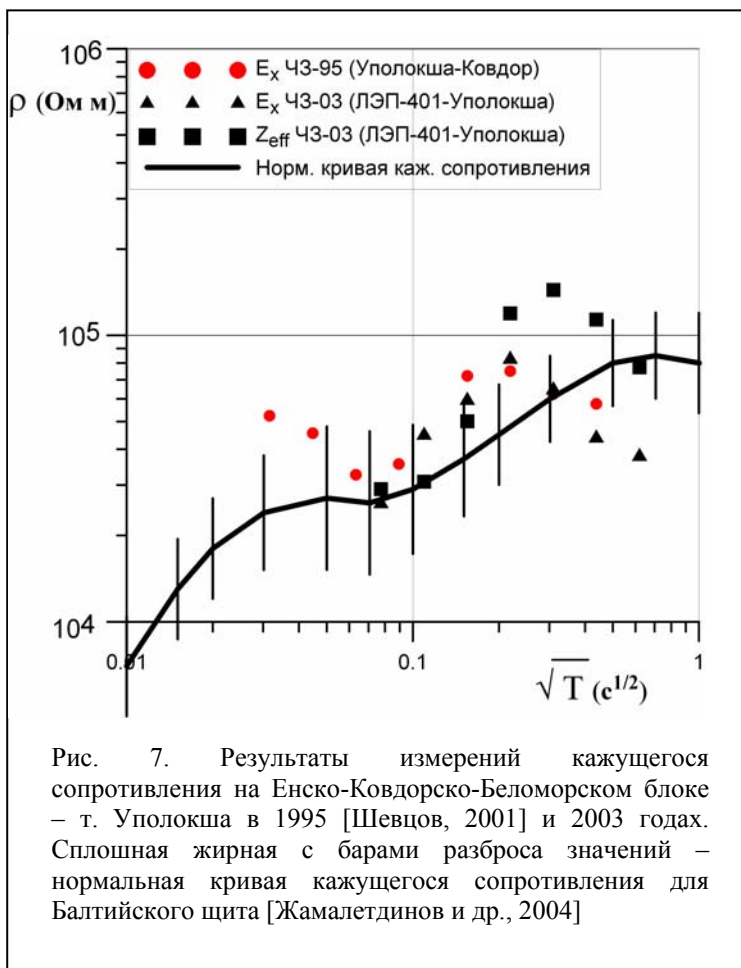
Метод эффективной линеаризации, предложенный Л.Н. Пороховой и М.М. Харламовым [Pogokhova, Kharlamov, 1990] для решения задач одномерных и двумерных задач магнитотеллурики обладает хорошей сходимостью и достаточно просто обобщается для компонент поля горизонтального электрического диполя [Шевцов А.Н., 1995, 2001]. В основе метода лежат эффективные оценки функционала невязки и нелинейной части приращения оператора прямой задачи для малого приращения модельной функции проводимости. применения метода эффективной линеаризации автором были использованы представления оператора прямой задачи [Boerner, West, 1989], ядер Фреше и оценки нелинейной части приращения электромагнитного поля горизонтального электрического диполя [Chave, 1984, Харламов 1987, 1990, Шевцов, 1995, 2001]. Подставляя их в выражения (16) и (21) вместо операторов  $\mathbf{E}_{HED}$ ,  $\mathbf{H}_{HED}$  и выполняя интегрирование по контуру источника, получим, оператор прямой задачи, ядра Фреше и оценки нелинейной части приращения поля длинной заземленной линии. В качестве начального приближения использовалась модель, полученная методом контролируемой трансформации Молочнова – Ле Вьета [Шевцов, 1999]

При использовании в одном пункте зондирования полей от двух и более линий электропередачи, обеспечивающих несколько независимых поляризации первичного поля, по результатам измерений электрических и магнитных компонент определяются основные и дополнительные компоненты тензора импеданса, компоненты вектора Паркинсона-Визе, что позволяет оценивать влияние возможных горизонтальных неоднородностей и анизотропных свойств пород.

В случае преимущественно одномерного распределения удельной электропроводности по вертикали, при решении обратной задачи мы получаем возможность построения согласованной модели, удовлетворяющей наблюдениям со всеми источниками первичного поля во всем частотном диапазоне исследований.

### 2.2. Нормальный геоэлектрический разрез и результаты инверсии в точке Уполокша.

В областях расположенных вдали от приповерхностных коровых аномалий проводимости, результаты электромагнитных измерений можно представить в виде нормальной кривой для кажущегося сопротивления [Жамалетдинов и др. 2004]. Участок нормальной кривой в исследованном частотном диапазоне в экспериментах с ЛЭП в 2003 году в точке Уполокша представлен на рис. 7 жирной сплошной линией с областью разброса величины измеренного кажущегося сопротивления. Здесь же жирными точками представлены результаты измерений 1995 г. в т. Ковдор с дипольным источником, расположенным в точке Уполокша на удалении 50 км для экваториальной установки [Шевцов, 2001]. Также на рис. 7 показаны значения кажущегося сопротивления по электрическому полю (треугольники) ЛЭП-401 и по квадратному корню из определителя матрицы импеданса (квадратики) – по эффективным значениям импеданса инвариантным относительно поворота измерительной установки вокруг вертикальной оси. Эффективные значения получены в т. Уполокша с линиями ЛЭП-401 и ЛЭП-154 в 2003 г. на удалении свыше 180 и 100 км соответственно. Представленные на рис. 7 результаты измерений имеют близкие значения кажущегося сопротивления и в пределах разброса в целом согласуются с нормальной кривой кажущегося сопротивления для Балтийского щита.



Вместе с тем имеются и заметные расхождения кривых кажущегося сопротивления для ЛЭП-401 и ЛЭП-154 (рис. 6), как и их отличие от нормальной кривой. Вероятно, это связано с разными геоэлектрическими разрезами под участками ЛЭП, которые служили в качестве источников поля.

Результаты одномерной инверсии нормальной кривой кажущегося сопротивления с учетом данных в точке Уполокша для главных компонент электрического поля ЛЭП-401 и ЛЭП-154 представлены на рис. 8. Инверсия выполнена методом эффективной линеаризации. В качестве начальных приближений использовались результаты дифференциальной трансформации Молочнова–Виета (показаны пунктиром) для оценок нормальных значений кажущегося сопротивления Балтийского щита снизу и сверху. Несмотря на ряд отличий в полученных разрезах, они достаточно хорошо согласуются между собой в общих чертах. Выделена область пониженного сопротивления верхней части разреза – до 30 м, область DD-слоя (2 – 10 км) [Жамалетдинов и др., 2005] и понижение сопротивления ниже уровня  $10^4$  Ом·м на глубинах свыше 100 км.

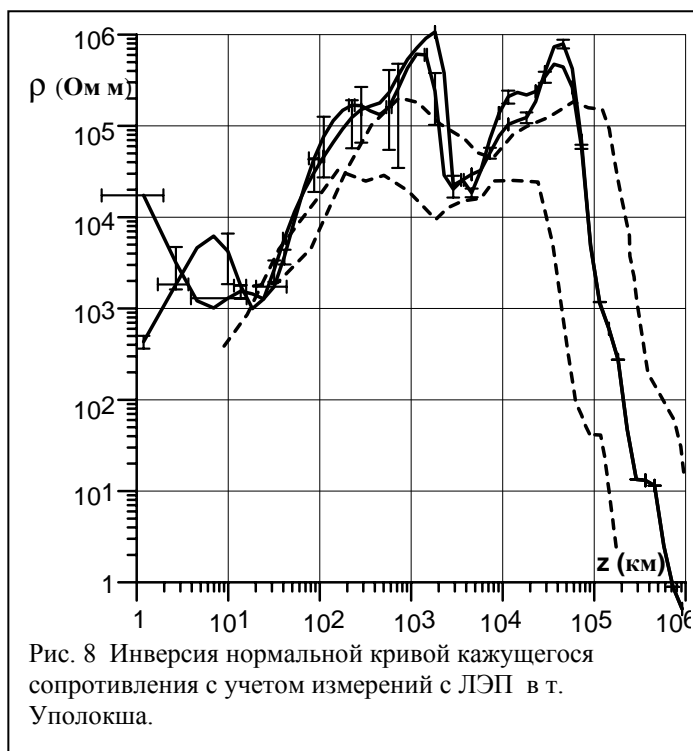


Рис. 8 Инверсия нормальной кривой кажущегося сопротивления с учетом измерений с ЛЭП в т. Уполокша.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-05-64708), по приоритетному направлению ОНЗ РАН – 6: «Геодинамика и механизмы деформирования литосферы»

#### Список литературы

1. Александров Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. 1989
2. Вагин С.А. Алгоритм двумерной интерпретации магнитотеллурических данных для E- и H-поляризации поля. // Вопросы геофизики. Вып. 35, СПб., СПбГУ, с. 176-187, 1998.
3. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. 1980
4. Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Токарев А.Д., Кононов Ю.М., Ваньян Л.Л. Влияние ионосферы и токов смещения на результаты глубинных электромагнитных зондирований в поле СНЧ-антенны. // ДАН, 1999. Т. 366, № 5. С. 688-691.
5. Жамалетдинов А.А., Пертель М.И., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. и раб. группа BEAR. «Нормальная» кривая кажущегося удельного электрического сопротивления в диапазоне частот  $10^{-2}$ – $10^6$  Гц для территории Балтийского щита. // Вопросы геофизики. Вып. 36. СПб., 2004– Ученые записки СПбГУ; №434)
6. Жамалетдинов А.А., Короткова Т.Г., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Невретдинов Ю.М., Зархи И.М., Копытенко Ю.А., Копытенко Е.А., Гохберг М.Б., Песин Л.Б., Шершнев Ю.А. Сверхглубинное зондирование литосферы Балтийского щита с применением промышленных ЛЭП. // ДАН, 2005. Т. 405, №5. С. 666-669
7. Харламов М.М. Эффективная процедура минимизации невязки в нелинейных обратных задачах геофизики. // Методика и результаты геофизических исследований докембрийских пород восточной части Балтийского щита. Петрозаводск. С. 139-144, 1987.
8. Харламов М.М. Ограничения, связанные с использованием линеаризационной процедуры в задачах индукционных зондирований. // Проблемы изучения докембрийских образований геофизическими методами. Петрозаводск. С. 105-112, 1990
9. Шевцов А.Н. Обратная задача частотных электромагнитных зондирований в случае одномерных сред. Метод эффективной линеаризации. // Материалы 9-й молодежной научной конференции «Геология Балтийского щита и других докембрийских областей России». Апатиты. С. 99 - 104, 1995
10. Шевцов А.Н. Применение дифференциальных трансформаций в методе частотного зондирования. // Геология и полезные ископаемые северо-запада и центра России (материалы 10-й молодежной конференции памяти К.О. Кратца), Апатиты, , 1999, с. 176-179
11. Шевцов А.Н. Метод частотного зондирования при изучении электропроводности верхней части коры Балтийского щита. //Диссертация на соискание степени кандидата физ.-мат. наук. 98 с., СПб. 2001.
12. Уэйт Дж. Геоэлектромагнетизм. 1987
13. Chave A.D.. The Freshet Derivatives of Electromagnetic Induction. // JGR, 89, B5, 3373-3380, 1984.
14. Boerner D.E., West G.F.. A generalized representation of the electromagnetic fields in layered earth. // Geophysical Journal, 97, 529-548, 1989.

15. Porokhova L.N., Kharlamov M.M. The solution of the one-dimensional inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique.// *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1990, 60, p. 68-79
16. T. Grant Caldwell, Hugh M. Bibby, Colin Brown. Controlled source apparent resistivity tensors and their relationship to the magnetotelluric impedance tensor // *Geophysics Journal Interior*, 2002, 151, 755-770

## Глава 2. Экспериментальные исследования взаимодействия СНЧ-радиоволн с земной корой.

**Велихов Е.П.<sup>1</sup>, Жамалетдинов А.А.<sup>2</sup>, Собчаков Л.А.<sup>3</sup>, Вешев А.В.<sup>3</sup>, Сараев А.К.<sup>3</sup>, Токарев А.Д.<sup>2</sup>, Шевцов А.Н.<sup>2</sup>, Васильев А.В.<sup>2</sup>, Сонников А.Г.<sup>4</sup>, Яковлев А.В.<sup>4</sup> (1994). Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ - диапазона. // ДАН. Т. 338, N 1. С. 106-109.**

<sup>1</sup>Российская Академия наук

<sup>2</sup>Геологический институт Кольского научного центра Российской Академии наук, Апатиты Мурманской обл.

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт земной коры Санкт-Петербургского государственного университета

<sup>4</sup>Российский институт мощного радиостроения, Санкт-Петербург

Совершенствование методов глубинного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощных контролируемых источников поля является актуальной проблемой фундаментальной и прикладной геофизики. Применение мощных закрепленных источников позволяет с минимальными затратами исследовать большие территории земной коры, сохраняя высокую точность и воспроизводимость результатов. Среди работ этого направления следует отметить первое глубинное зондирование с батареей аккумуляторов в Финском заливе [1], глубинные исследования с МГД-генератором "Хибины" на Кольском полуострове [2,3], зондирование с ЛЭП постоянного тока 800 кВ "Волгоград-Донбасс" в Центральной России [4], а также зондирования с ЛЭП ПТ "Кабора-Басса" в Южной Африке [5] и зондирования с отрезками промышленных ЛЭП в Северной Америке [6,7].

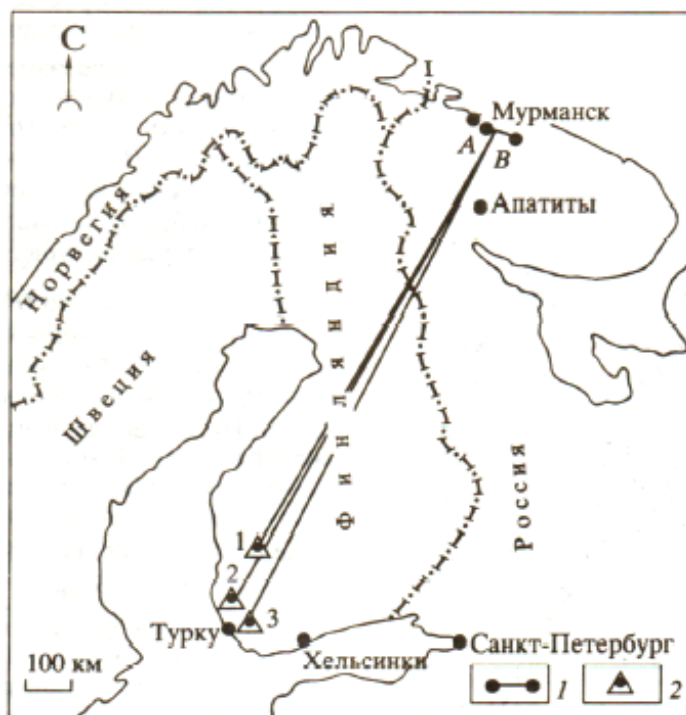


Рис. 1. Схема расположения пунктов и трасс зондирования со СпецЛЭП СНЧ-диапазона. 1 - положение передающей антенны (заземленной линии АВ длиной 60 км); 2 - пункты приема и их номера (1-Паркано; 2-Рапакиви; 3-Турку).

Новые перспективы глубинных исследований литосферы открывает использование мощных передатчиков СНЧ-диапазона. Одна из таких установок расположена на северо-западе Кольского полуострова (рис.1). Передатчик состоит из двух свитч-генераторов синусоидального напряжения и двух параллельных горизонтальных заземленных антенн длиной около 60 км каждая. Генераторы обеспечивают ток в антеннах до 200-300А в диапазоне частот от 20 до 250 Гц. Важной особенностью антенн является их расположение на поверхности однородного плохопроводящего блока, сложенного гранито-гнейсами древнейшего протофундамента (Мурманский блок). Эффективная проводимость среды под антенной не превышает  $2 \cdot 10^{-5}$  См/м. Это означает, что на средней частоте 100 Гц горизонтальный магнитный момент антенны  $M = J L h_s$  достигает  $1,5 \cdot 10^{11}$  А·м<sup>2</sup> ( $J$  - сила тока,  $L$  - длина антенны,  $h_s$  - толщина скин-слоя). Синусоидальный ток может задаваться в диапазоне 20-250 Гц по любой сетке частот с шагом 0.1 Гц. Ход задающего кварцевого генератора определяется системой "Гиацинт" с точностью не хуже  $10^{-7}$ с.

Перечисленные выше и ряд других параметров определяют широкие

возможности применения СНЧ-антенн при глубинных и площадных геоэлектрических исследованиях. Впервые аналогичная антенна была применена в конце 70-х годов для электроразведки [8]. В 1990-1991 годах были выполнены первые зондирования в поле СНЧ-антенны для изучения глубинного разреза Мурманского блока и исследования строения рудного поля Панско-Цагинской зоны. С помощью СНЧ-антенны удалось обнаружить проводящий слой на глубине 2 км, подтвержденный позже данными бурения. Слой приурочен к перспективной на полезные ископаемые зоне сульфидного и магнетитового оруденения.



Первый крупномасштабный эксперимент по глубинному зондированию земной коры с СНЧ-антенной был осуществлен в 1992 году на юго-западе Финляндии (рис.1). Измерения осуществлялись с помощью 5-канальной цифровой станции, разработанной для этой цели в Геологическом институте КНЦ РАН совместно с Полярным геофизическим институтом. С целью повышения помехозащищенности измерительного блока в станции применена система гетеродинарования. Спектр сигнала при этом переносится на заданную (промежуточную) частоту, выбранную равной 1 Гц для удобства записи в цифровом виде. Пример регистрации сигнала на частоте 125 Гц в точке Паркано показан на рис. 2 в виде распечатки с экрана компьютера "Компан АТ-Турбо", обработка на котором осуществлялась непосредственно в полевых условиях.

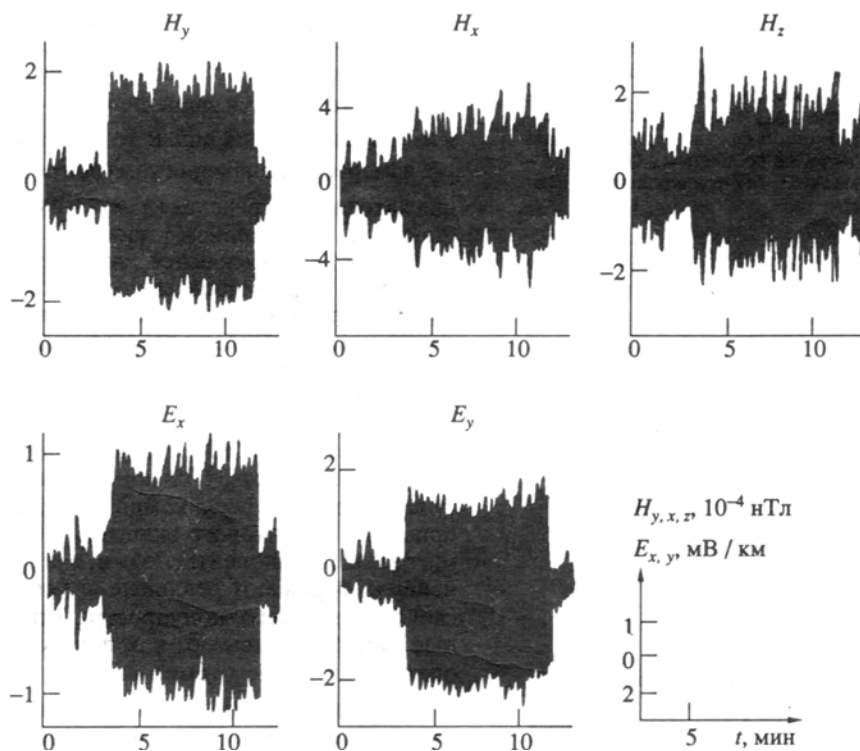


Рис. 2. Пример записи сигнала в точке Паркано на разnose 920 км (точка 1 на рис.1, распечатка с экрана компьютера).

Магнитное поле измерялось с помощью индукционных датчиков, ориентированных в направлениях "север-юг" ( $H_y$ ), "восток-запад" ( $H_x$ ) и вертикально ( $H_z$ ). Соответственно, электрические линии ориентировались на север ( $E_y$ ) и на восток ( $E_x$ ). Обработка данных осуществлялась путем вычисления кажущегося сопротивления  $\rho_\omega$  по электрическому полю ( $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_{tot} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ ) с нормировкой по волновой зоне на соответствующие геометрические коэффициенты и значений  $\rho_T$  с нормировкой по входным импедансам ( $Z^{xy}$ ,  $Z^{xx}$  и  $Z^{eff}$ ). Наиболее надежные результаты были получены в точке Паркано. Здесь наблюдаются несущественные расхождения между значениями кажущегося сопротивления, определенными по отдельным компонентам ( $\rho_\omega^x$ ,  $\rho_\omega^y$ ) и по полному полю  $\rho_\omega^{tot}$ . Это указывает на относительную горизонтальную однородность среды в точке возбуждения и в точке приема. Горизонтальная неоднородность разреза вдоль трассы распространения сигналов не влияет на результаты наблюдений, поскольку расстояние между источником и точкой наблюдения составляет 8-10 длин волн в среде и основная часть энергии распространяется по воздуху.

Важной особенностью полученных результатов является резкое расхождение между импедансными и волновыми кривыми кажущегося сопротивления. На рис.3 можно видеть, что кривая  $\rho_\omega^y$  характеризуется значениями  $(2-5) \cdot 10^5$  Ом·м и имеет нисходящий вид. В то же время на кривой  $\rho_T^{yx}$  измеренные значения находятся в пределах  $(5-8) \cdot 10^4$  Ом·м и возрастают с понижением частоты. Отмеченные особенности объясняются влиянием ионосферы: в условиях сформировавшегося волновода земля-ионосфера электромагнитные волны распространяются со слабым затуханием. Поэтому общепринятая нормировка электрического поля по однородному нижнему полупространству, отделенному плоской границей от верхнего

полупространства (воздуха), без учета ионосферы дает завышенные значения  $\rho_\omega$ . При нормировке по импедансу влияние ионосферы компенсируется за счет ее примерно одинакового вклада в электрические и магнитные компоненты поля и, в результате, значения  $\rho_T$  отражают реальные электромагнитные свойства нижнего полупространства. Отмеченные свойства кривых  $\rho_\omega$  и  $\rho_T$  подтверждаются теоретическими расчетами.

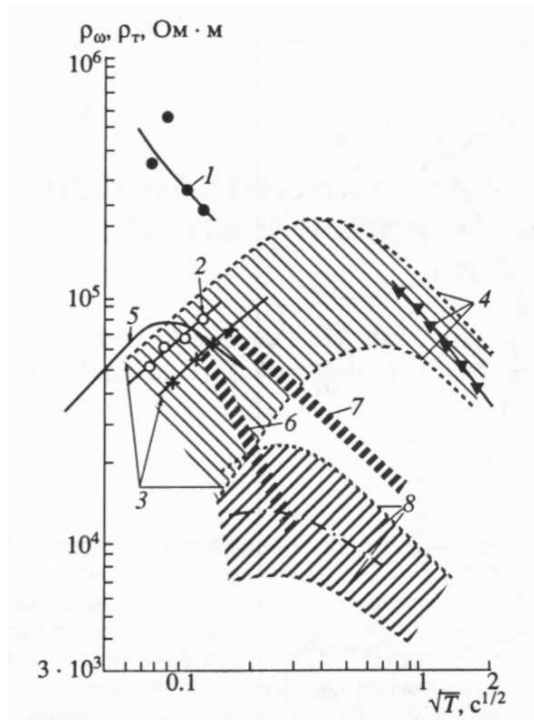


Рис. 3. Результаты электромагнитного зондирования с СНЧ-антенной в точке Паркано (кривые 1 и 2) в сопоставлении с результатами других методов зондирования на Балтийском щите.

1, 2 - кажущееся сопротивление в точке Паркано (1 -  $\rho_\omega^y$ , определено по компоненте  $E_y$  по волновой зоне; 2 -  $\rho_T^{yx}$ , определено по импедансу  $Z^{yx} = E_y/H_x$ ); 3 - обобщенные данные частотных зондирований на однородных плохопроводящих блоках Кольского п-ва; 4 - то же, данные МГД-зондирований [3]; 5 - результаты АМТ зондирования в Северной Финляндии [9]; 6 - "нормальная" кривая по данным АМТЗ [10]; 7 - то же по данным МТЗ [11]; 8 - обобщенные данные АМТ-МТ зондирований в Южной Финляндии [12].

Уменьшение напряженности  $E$  и  $H$  компонент электромагнитного поля с понижением частоты в условиях волновой зоны указывает на конечное сопротивление ионосферы. Ее электрические параметры могут быть исследованы путем сопоставления экспериментальных данных с теоретическими расчетами, основанными на хорошем знании электропроводности нижнего полупространства.

Результаты зондирования с СНЧ-антенной в т. Паркано сопоставлены на рис.3 с результатами других методов глубинного электромагнитного зондирования на Балтийском щите. Можно видеть, что кривая  $\rho_T^y$  удовлетворительно согласуется с высокочастотными ветвями аудиоманнитотеллурических (АМТ) и частотных зондирований по Карелии, Кольскому полуострову и Северной Финляндии (кривые 4-7) и резко расходится с данными АМТ-МТ зондирований в Южной Финляндии (кривая 8). Интерпретация кривой (2) на рис. 3 указывает на рост сопротивления с глубиной от  $(2-3) \cdot 10^4$  Ом·м на глубине 1-3 км до  $\sim 10^5$  Ом·м на глубине 10 км.

Дополнительную информацию о геоэлектрическом разрезе дают результаты обработки по остальным точкам. На рис. 4 представлены дистанционные зависимости  $E_y$  и  $\rho_\omega^y$  по трассе Паркано-Рапакиви-Турку. Можно видеть, что кажущееся сопротивление слегка возрастает над гранитным массивом Рапакиви и затем резко падает в районе Турку.

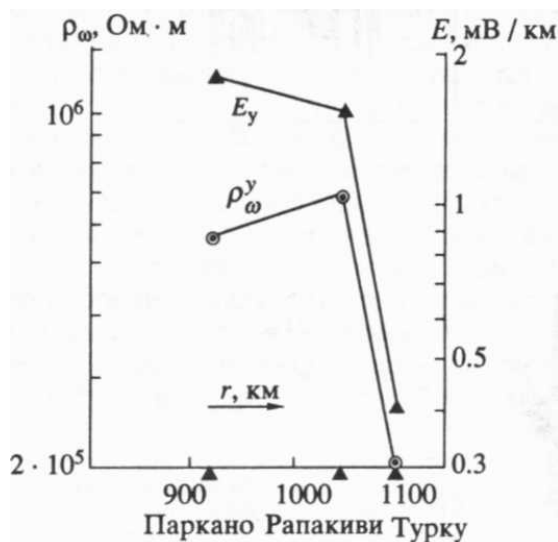


Рис. 4. Результаты измерений электрического поля  $E_y$  на частоте 125 Гц и значения  $\rho_\omega^y$  по трассе Паркано-Турку.

#### Список литературы

1. Краев А.П., Семенов А.С., Тархов А.Г. Разведка недр, 1974. N 3. С.40-41.

2. Велихов Е.П., Волков Ю.М. Глубинные электромагнитные зондирования с применением импульсных МГД-генераторов. Апатиты. Кольский филиал АН СССР, 1982. С.5-25.
3. Жамалетдинов А.А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками. Наука, 1990. 15 с.
4. Жамалетдинов А.А., Ковалевский В.Я., Павловский В.И., Таначев Г.С., Токарев А.Д. ДАН СССР, 1982. Т.265, N 5. С. 1101-1105.
5. Blohm E.K., Worzyk P., Scriba H. Journal of Geophysics, 43, 1977. P. 665-679.
6. Cantwell T. Nelson P., Well J., Orange A.S. Jour. of Geophys. Res., 1965, N 8, v. 70. P. 1931-1937.
7. Lienert B.R. Geophysics, 1979, v. 44, N 11. P. 1830-1846.
8. Вешев А.В., Яковлев А.В. Глубинное электромагнитное зондирование с применением промышленных линий электропередач. Апатиты. Кольский филиал АН СССР, 1981. С. 35-43.
9. Kaikkonen P., Vanyan L.L., Hjelt S.E., Shilovsky A.P., Pajunpaa K., Shilovsky P.P. Phys. Earth Planet. Inter., 1983, v.35. P. 245-305.
10. Ковтун А.А., Вагин С.А., Коквина Е.А., Порохова Л.Н., Чичерина Н.Д. Коровые аномалии электропроводности. Л. Наука, 1984. С. 68-75.
11. Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Васин Н.Д., Окулесский Б.А., Шиловский П.П. Физика Земли, 1980. N 2. С. 73-76.
12. Korja T. Electrical conductivity of the lithosphere. Oulu. Dep. of Gephys. Oulu Univers., 1990. 93 p.

**Сараев А.К.<sup>1</sup>, Собчаков Л.А.<sup>2</sup>, Васильев А.В.<sup>2</sup>, Жамалетдинов А.А.<sup>3</sup>, Песин Л.Б.<sup>4</sup> (1996)**  
**Перспективы использования СНЧ-радиоустановки для решения геолого-геофизических задач. // Тезисы докладов Международной конференции “Закономерности эволюции Земной коры” С.-Петербург, Россия, 1996, т. 1, С. 272**

<sup>1</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, aks@AS1002.spb.edu

<sup>2</sup>РИМР, Санкт-Петербург, Россия, vasilyev@rimr.ru

<sup>3</sup>ГИ КНЦ РАН, Апатиты, Россия, abd.zham@mail.ru

<sup>4</sup>ЦЕНТР ИНЭНКО, Санкт-Петербург, Россия,

Расположенная на Кольском п-ове 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. Диапазон рабочих частот десятки-сотни герц. В экспериментальном плане радиоустановка опробована на более низких частотах, в крайне низкочастотном (КНЧ) диапазоне до 0,32 Гц. В дальнейшем планируется создание генератора КНЧ диапазона (0,01-30 Гц).

При помощи СНЧ радиоустановки с учетом ее модернизации в плане расширения частотного диапазона в сторону низких частот могут решаться следующие задачи:

- создание геоэлектрических моделей земной коры изучаемых регионов;
- проведение глубинных геоэлектрических исследований по региональным профилям в первую очередь на участках с повышенным уровнем промышленных помех, где методы МТЗ и АМТЗ не позволяют получать качественные материалы;
- картирование геологических структур рудных районов для глубинного прогноза месторождений и выявления участков, перспективных на детальные поиски;
- глубинный прогноз месторождений углеводородов, в том числе расположенных на шельфе;
- проведение поисково-картировочных задач с выявлением рудных тел;
- картирование слабоконтрастных по удельному сопротивлению горных пород, где необходима высокая точность измерений, с решением геологических и экологических задач;
- мониторинг сейсмической активности;
- выбор площадок под строительство долговременных сейсмостойких сооружений, включая наземные и подземные АЭС;
- выявление и оконтуривание экологически безопасных блоков пород для строительства долговременных хранилищ радиоактивных отходов;
- получение опорных геоэлектрических разрезов на геофизических полигонах;
- оценка параметров и состояния ионосферы.

**Гохберг М.Б.<sup>1</sup>, Сараев А.К.<sup>2</sup>, Пертель М.И.<sup>2</sup> (1997) Исследования ионосферных возмущений вызванных карьерными взрывами в диапазоне сверхнизких частот // “Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов”, доклады конференции, Москва, 2-3 октября, 1997, Москва, 1999, С.**

<sup>1</sup>ОИФЗ РАН, Москва;

<sup>2</sup> Институт земной коры СПбГУ, С.-Петербург, aks@AS1002.spb.edu

Параметры ионосферных процессов привлекаются к изучению широкого класса сейсмических сигналов. Регистрация ионосферных возмущений используется для детектирования и дискриминации поверхностных промышленных и подземных ядерных взрывов. На основе наземных и спутниковых наблюдений ионосферных предвестников развиваются методы краткосрочного прогноза землетрясений [1].

Ранее при проведении экспериментальных исследований было установлено, что реакция ионосферы на процессы подготовки землетрясений и на воздействия наземных или глубинных взрывов достаточно близка по физическому механизму, хотя может отличаться по частоте и характеру диссипации. Одно из наиболее эффективных средств крупномасштабного моделирования сейсмо-ионосферных связей - воздействие на ионосферу мощным взрывом. Широко известен эксперимент МАССА, выполненный в 1981 г. для изучения сейсмоакустических явлений в атмосфере и ионосфере с использованием специально подготовленного и произведенного вблизи г. Алма-Аты взрыва [2]. В результате этого эксперимента получен ряд важных научных результатов и обнаружены новые явления, которые способствовали развитию представлений о динамике ионосферных процессов. Описаны в литературе и другие эксперименты, связанные с наблюдениями эффектов, вызванных промышленными и ядерными взрывами.

Актуальность изучения, вызванных взрывом ионосферных эффектов возросла после появления моделей, использующих акустико-гравитационные волны (АГВ) как механизм литосферно-ионосферного взаимодействия в период подготовки землетрясения. В соответствии с этими моделями источником АГВ могут служить экспериментально обнаруженные нестационарные атмосферные аномалии, которые связаны, например, с выходом газов и испарением воды в зонах разломов перед землетрясением [2]. Относительный вклад этих волн по сравнению с другими возможными механизмами сейсмо-ионосферного взаимодействия (электромагнитный каплинг и др.) растет с высотой вследствие уменьшения плотности атмосферы.

Механизм воздействия взрыва на ионосферу можно представить следующим образом [3]. Образующаяся после взрыва ударная волна трансформируется в акустическую. Акустическая волна, распространяющаяся вверх и несущая значительную энергию, примерно за 6 мин достигает ионосферы и приводит к заметным изменениям электронной концентрации в областях *E* и *F*. На пути движения акустический импульс от локального взрыва существенно расширяется. Вход акустической волны в ионосферу сопровождается генерацией электромагнитных колебаний и возникновением возмущений, фиксируемых различными методами зондирования ионосферы на расстоянии до нескольких сотен и даже первых тысяч километров.

Классическим инструментом изучения ионосферы являются методы вертикального зондирования в мегагерцовом диапазоне частот. Этими методами исследуется строение ионосферы, а также суточные и сезонные изменения ее параметров. Используются также частоты порядка 10-15 кГц (система "Омега") и 16-70 кГц (передатчики сигналов точного времени), на которых основан метод наклонного зондирования ионосферы для целей прогнозирования землетрясений [4]. Численные расчеты показывают, что при понижении частоты от 10 кГц до 1 кГц информативность изучения состояния ионосферы, особенно при акустическом воздействии, резко увеличивается. Поэтому использование более низкочастотного диапазона при изучении сейсмо-ионосферных взаимодействий представляется весьма перспективным.

Для оценки ионосферных эффектов, вызванных мощными наземными взрывами, в 1996-1997 г.г. нами были выполнены экспериментальные работы с применением в качестве источника электромагнитного поля мощной сверхнизкочастотной (СНЧ) радиоустановки "Зевс". СНЧ-радиоустановка находится на Кольском полуострове (рис. 1). Она состоит из генератора гармонически изменяющегося тока, а также горизонтально расположенной и ориентированной в широтном направлении антенны (заземленной на концах линии электропередачи длиной около 60 км). Величина тока в антенне составляет 200-300 А. Рабочие частоты меняются в диапазоне от десятков до сотен герц. Дальнейшее действие комплекса составляет около 10 000 км.

Ранее были показаны принципиальные возможности применения данного источника для электромагнитных зондирований [5] и мониторинга напряженного состояния геологической среды [6]. В настоящее время проводятся исследования электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, разработка аппаратно-методических и программных средств для ее использования при решении геолого-геофизических задач.

При проведении экспериментальных работ точка измерений была выбрана на Карельском перешейке. Полигон "Вуокса", на котором выполнялись измерения, расположен на расстоянии 950 км от СНЧ-радиоустановки (см. рис. 1). Расположение данного полигона благоприятно для проведения подобных экспериментов, так как он удален от высоковольтных ЛЭП и местных линий электропередач и характеризуется низким уровнем промышленных помех.

При проведении измерений нами применялись различные модификации созданной в НИИ земной коры СПбГУ аппаратуры корреляционных функций (АКФ), предназначенной для работ методом аудиоманнитотеллурического зондирования. С помощью аппаратуры АКФ измеряются сигналы горизонтальных составляющих электрического поля  $E$  с использованием заземляемых электрических приемных линий длиной обычно от 20 до 100 м и горизонтальных составляющих магнитного поля  $H$  с использованием индукционных магнитных антенн с уровнем собственных шумов на частоте 10 Гц не более  $17 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ .

Аналоговая часть аппаратуры АКФ представлена усилителями, имеющими ступенчатое переключение аттенюации и возможность подавления промышленных частот режекторными фильтрами, что обеспечивает линейное преобразование входных сигналов амплитудой от 1 мкВ до 0.3 В. В цифровой части аппаратуры производится накопление автокорреляционных функций  $K_{EE}(\tau)$  и  $K_{HH}(\tau)$ , связанных с горизонтальными составляющими электрического и магнитного полей, а также их взаимной корреляционной функции  $K_{EH}(\tau)$ .

С помощью Фурье-преобразования через корреляционные функции находятся энергетические спектры  $S_{EE}(f)$  и  $S_{HH}(f)$ , по которым определяются значения модулей

импеданса  $|Z_{xy}|$ . Кажущееся удельное электрическое сопротивление  $\rho_k$  рассчитывается по формуле для плоской вертикально падающей волны  $\rho_k = |Z_{xy}|^2 / (\mu_0 \omega)$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота.

Фаза импеданса  $\varphi_z$  вычисляется по реальной и мнимой частям взаимной спектральной плотности сигналов  $S_{EH}(f)$ . Для оценки доли некогерентной части в изучаемых сигналах вычисляются значения коэффициента когерентности  $G_{EH}$ . Величина коэффициента когерентности позволяет оценивать достоверность получаемых результатов.

В рассматриваемых экспериментальных работах использовались двухканальные модификации аппаратуры АКФ: приборы АКФ-2 и АКФ-2.2. Диапазон рабочих частот для прибора АКФ-2 составляет 1-12800 Гц, разрешение по частоте равно 0.1 Гц. Для измерений сигналов СНЧ-радиоустановки разработан прибор АКФ-2.2, в котором реализовано разрешение по частоте 0.007 Гц. Узкополосный режим измерений позволяет увеличить соотношение полезный сигнал/шум и повысить точность измерений сигналов источника гармонически изменяющегося поля [7]. На рис. 2 показано сопоставление спектральных плотностей мощности магнитного поля (СПМ  $H(f)/H_0$ ) при использовании аппаратуры АКФ-2 и АКФ-2.2. Для прибора АКФ-2 характерно превышение СПМ  $H(f)/H_0$  сигнала СНЧ-радиоустановки над уровнем СПМ естественного магнитного поля примерно на порядок, тогда как прибора АКФ-2.2 это превышение составляет более двух порядков.

Перед проведением экспериментальных работ были выполнены круговые измерения сигналов СНЧ-радиоустановки, по результатам которых выбирались направления максимальных значений электрического и магнитного полей. Эти направления соответствовали азимутам для электрической приемной линии  $120^\circ$  и для магнитной антенны  $30^\circ$ , что подтверждается результатами расчетов поля СНЧ-радиоустановки для данного района работ. По результатам предшествующих исследований установлено, что первичные электрическое и

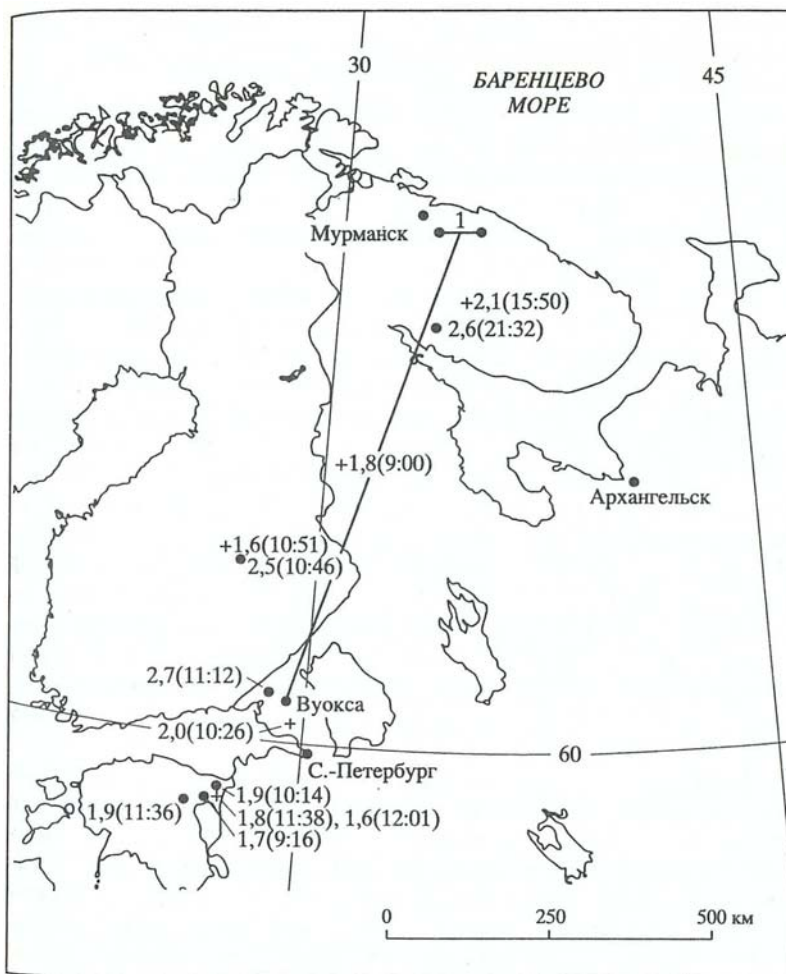


Рис. 1. Схема расположения СНЧ-радиоустановки (1) на Кольском п-ове и полигона «Вуокса» на Карельском перешейке. Черными точками показаны карьерные взрывы для периода 26-27 июня 1996 г., крестиками – для периода 25-26 июня 1997 г.

магнитное поля СНЧ-радиоустановки в этом районе поляризованы эллиптически с отношением малой и большой полуосей эллипса поляризации, равным 0.3 [8].

Сведения о промышленных наземных взрывах были получены из сети "Интернет" по данным наблюдений сейсмологических станций, расположенных в скандинавских странах. По всей вероятности, наиболее существенный вклад в изменения регистрируемых сигналов должны вносить ионосферные возмущения, вызванные взрывами вблизи источника и точки наблюдения, а также вдоль трассы прохождения сигнала СНЧ-радиоустановки. Учитывая опыт предшествующих исследований по изучению воздействия взрывов на ионосферу, нами при анализе были учтены взрывы, произведенные в периоды наблюдения на удалении не более чем 200-300 км от указанной области. Зарегистрированные сейсмические события показаны на рис. 1 черными точками для периода 26-27 июня 1996 г. и крестиками для периода 25-26 июня 1997 г. Около точки или крестика указаны магнитуда и время данного сейсмического события (здесь и далее приводятся значения мирового времени UT, отличающегося от московского на 4 ч). Идентификация этих сейсмических событий как промышленных взрывов производится на основе данных сейсмологической сети (все они зарегистрированы как поверхностные) и по сопоставлению с местоположением известных карьеров горнодобывающих предприятий.

Измерения полей СНЧ-радиоустановки в ходе экспериментов проводились через каждые 20 мин. При этом источник включался на 7 мин по заранее согласованному расписанию. Непосредственно измерения сигналов СНЧ-радиоустановки обычно выполнялись в течение 4-5 мин во время 7-минутных включений источника. Для экспериментальных измерений 26-27 июня 1996 г. была выбрана частота 80 Гц, 25-26 июня 1997 г. - 175 Гц. По результатам обработки данных измерений построены графики изменений во времени значений  $\lg \rho_k$ ,  $\varphi_z$  и  $\lg \text{СПМ } H(a)/H_0$ . После проведения экспериментальных измерений были получены данные о мощности излучения СНЧ-радиоустановки. По этим данным величина тока в антенне в ходе эксперимента практически не менялась, и вводить соответствующую нормировку при обработке не было необходимости. Характер изменения во времени спектральной плотности мощности электрического поля  $\lg \text{СПМ } E(f)/E_0$  был близок к изменению  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и здесь не рассматривается.

При анализе результатов экспериментальных работ нами учитывались промышленные взрывы различной мощности как вблизи источника, так и вблизи точки наблюдения и трассы распространения электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. Вклад этих взрывов в изменение сигнала источника может быть неодинаков. Кроме того, в ходе экспериментов обычно происходило несколько взрывов почти одновременно, с интервалом 0.5-1 ч. Поэтому выявить закономерности реакции ионосферы на единичный взрыв по полученным в результате достаточно дискретных наблюдений материалам оказалось сложным, и приводимые количественные характеристики относятся к оценочным.

На рис. 3 представлены графики изменения  $\lg \rho_k$ ,  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$ , полученные на частоте 80 Гц при помощи аппаратуры АКФ-2.2 в период времени с 5:20 26 июня по 6:20 27 июня 1996 г. Часть точек измерений этого сеанса была исключена из анализа, так как в определенные периоды времени СНЧ-радиоустановка работала в другом режиме. Случаи работы источника в другом режиме определяются по характеру регистрации  $\text{СПМ } H(f)/H_0$  сигналов СНЧ-радиоустановки и пониженным значениям когерентности (для анализа использовались точки с когерентностью  $G_{\text{ЕН}} > 0.98$ ). На горизонтальной шкале рассматриваемого графика черными точками показаны сейсмические события, зарегистрированные сетью сейсмостанций в этот период времени. Положение каждой точки соответствует моменту взрыва, а магнитуда характеризуется величиной точки и соответствующим числовым значением около нее.

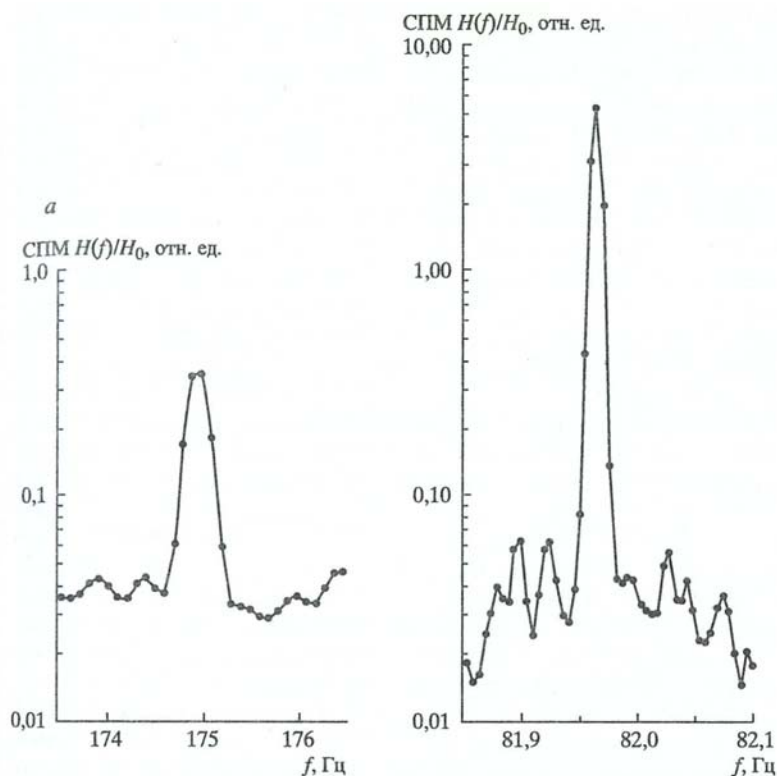


Рис. 2. Сопоставление спектральных плотностей мощности магнитного поля при частотном разрешении 0.1 Гц (а) и 0.007 Гц (б).

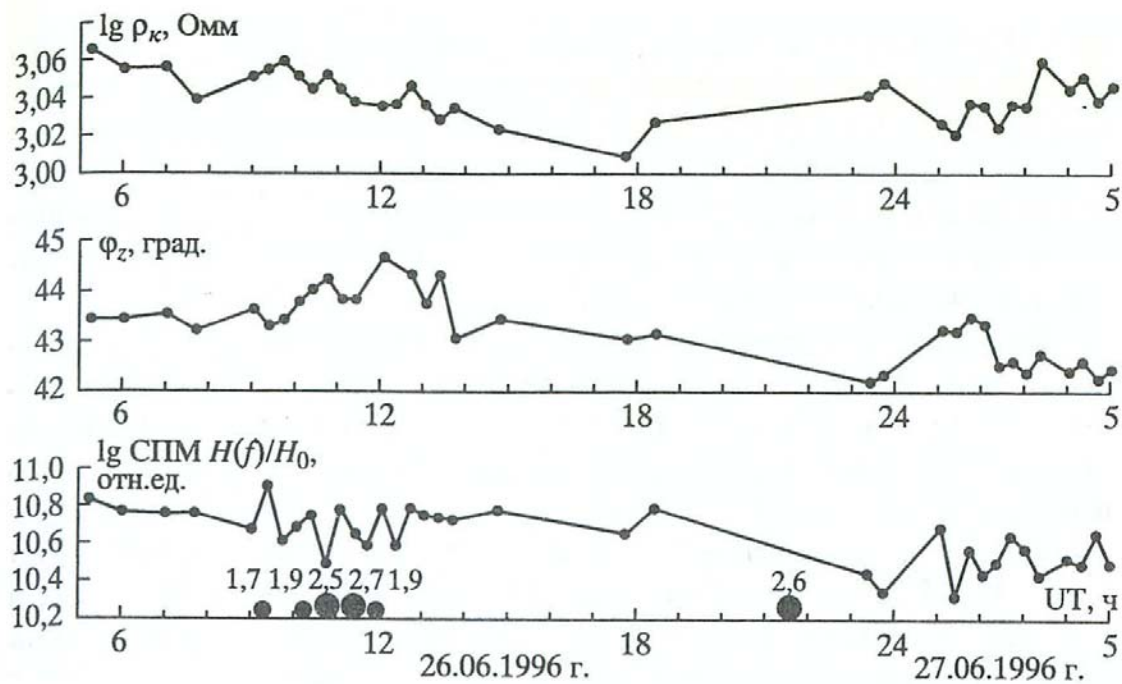


Рис. 3. Вариации регистрируемых параметров на частоте 80 Гц.

Сравнение приведенных различных характеристик поля показало, что наиболее информативны с точки зрения изучения реакции ионосферы на воздействие взрывов величины  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$ . Значения  $\lg \rho_k$  в этом плане оказалась менее информативными. Это подтверждает общепринятые представления о целесообразности использования импеданса электромагнитного поля для изучения строения земной коры, на который возможные нестабильности ионосферы влияют в меньшей степени. Кроме того, в результате предшествующих исследований установлено заметное влияние на поведение амплитуды импеданса или кажущегося удельного электрического сопротивления другого фактора - деформаций земной коры, вызванных приливными явлениями [6]. Это влияние является мешающим фактором при исследованиях ионосферных эффектов, и далее анализируется в основном поведение графиков  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$ .

Анализ представленных на рис. 3 графиков показывает, что до взрывов в период с 5:20 до 9:00 26 июня фоновая обстановка характеризуется спокойным характером поведения  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  (относительные изменения составляют 3-4%) и  $\varphi_z$  (относительные изменения составляют  $\pm 0.2^\circ$ ). После взрывов на графике  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  в период с 9:00 по 13:00 26 июня наблюдаются изменения в виде цуга колебаний с периодом около 1 ч. Относительные изменения амплитуды магнитного поля в данном случае составляет около 20-25%. Для графика фазы импеданса характерно несколько отличающийся характер колебаний с общим повышением значений  $\varphi_z$ , примерно на 1-1.5°. Аналогичный характер изменения графиков  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$  как реакция на взрыв магнитудой 2.6, произведенный в 21:32 на Кольском полуострове, наблюдается и в период с 23:40 26 июня до 2:20 27 июня. Колебания значений  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$  свидетельствуют о существенном влиянии в данном случае возмущения ионосферы на регистрируемые сигналы СНЧ-радиоустановки.

Влияние ионосферных возмущений, вызванных промышленными взрывами, также проявляется в изменении формы графиков зарегистрированных сигналов СНЧ-радиоустановки. На рис. 4 показаны графики  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$ , полученные при помощи, использовавшейся в данном эксперименте аппаратуры АКФ-2.2 с разрешением по частоте 0.007 Гц в период с 7:00 до 13:40 26 июня 1996 г. Для соответствующих периодов на рисунке отмечены сейсмические события и их магнитуда. Как видно из рисунка, ионосферные возмущения проявляются с некоторым запаздыванием по времени и в некотором искажении формы сигнала  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  (он становится более широким) и уменьшении его амплитуды. Оценка интегральных значений сигналов указывает на более постоянный характер поведения магнитного поля во времени. Это свидетельствует о том, что под действием взрывов происходят колебания нижней кромки ионосферы, изменение высоты волновода и модуляция сигнала СНЧ-радиоустановки.

Дискретность измерений не позволила достаточно точно оценить период запаздывания реакции ионосферы. Имеющиеся данные, приведенные на рис. 4, указывают на период времени запаздывания 30-50 мин. Запаздывание реакции ионосферы на воздействие взрыва также видно из сопоставления интервалов 12:40-13:40 и 0:40-1:20 на рис. 4. Аномальные изменения  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  наблюдаются спустя 2-3 ч после взрыва, а для  $\varphi_z$  эффект последствия проявляется примерно на один час позже.

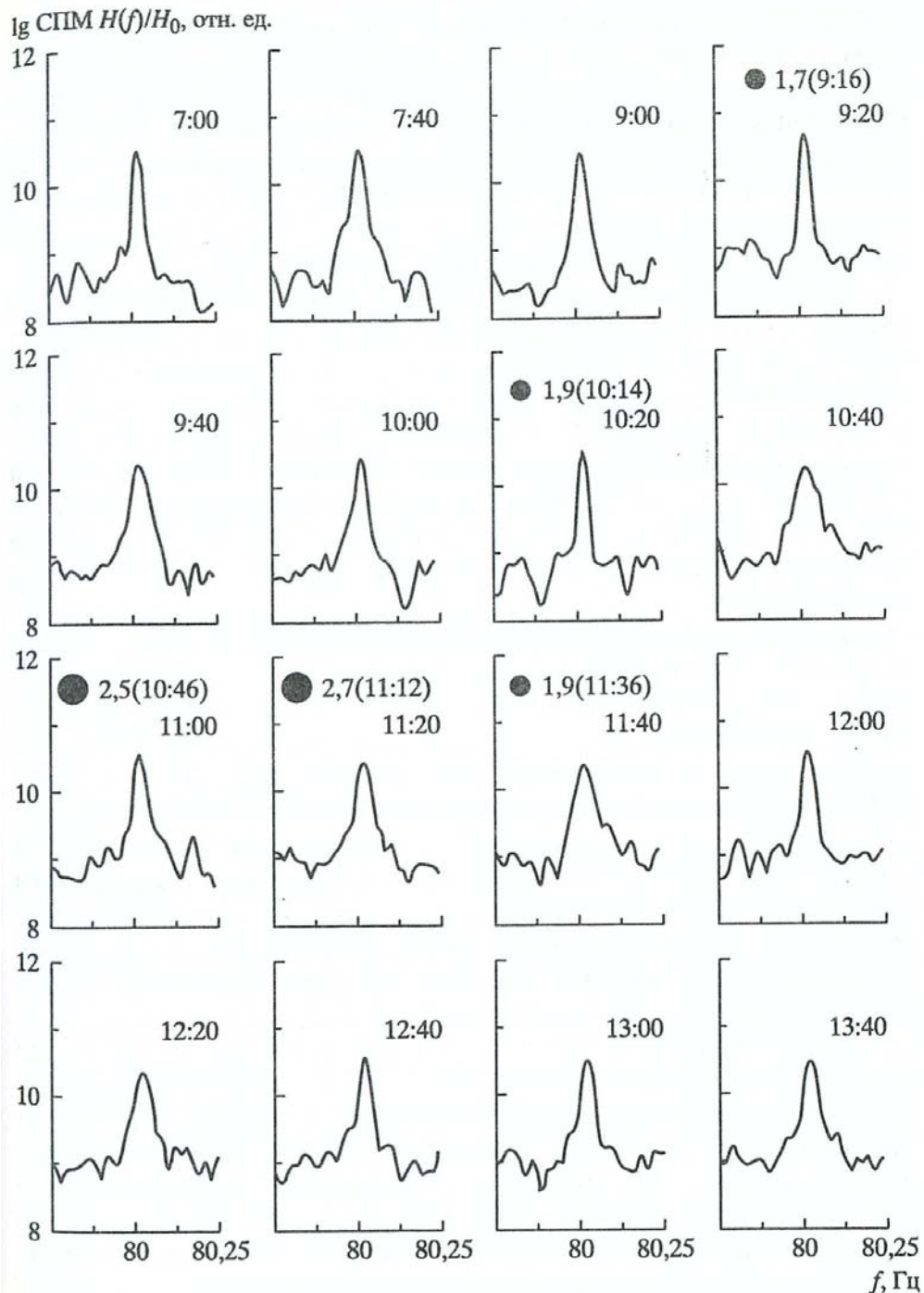


Рис. 4. Изменения формы сигналов СНЧ-радиоустановки после карьерных взрывов. Черными точками отмечены периоды взрывов, цифрами указаны время и магнитуда.

Интервал с 2:20 по 6:20 27 июня при отсутствии воздействия взрывов характеризуется достаточно спокойным поведением графиков  $\lg$  СПМ  $H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$ , причем значения фазы импеданса имеют менее выраженные флуктуации.

На рис. 5 приведены графики значений  $\lg$  СПМ  $H(f)/H_0$ , полученные по результатам экспериментальных работ в период с 7:00 25 июня по 4:40 26 июня 1997 г. при помощи аппаратуры АКФ-2 на частоте 175 Гц (сигналы СНЧ-радиоустановки), а также средние значения для естественного переменного магнитного поля в диапазонах частот 165-175 и 180-185 Гц. В данном эксперименте, наряду с измерениями через каждые 20 мин, в интервале с 8:00 до 11:00 наблюдения были выполнены через 10 мин. В этот период была заранее предусмотрена непрерывная работа СНЧ-радиоустановки для изучения воздействия на ионосферу, планировавшегося в 9:00 карьерного взрыва в районе г. Костомукши. Как и в предыдущем эксперименте, часть точек была исключена из рассмотрения, так как СНЧ-радиоустановка работала в другом режиме. Сейсмические



события и их магнитуды отмечены на приведенных графиках крестиками соответствующей величины и числовыми значениями.

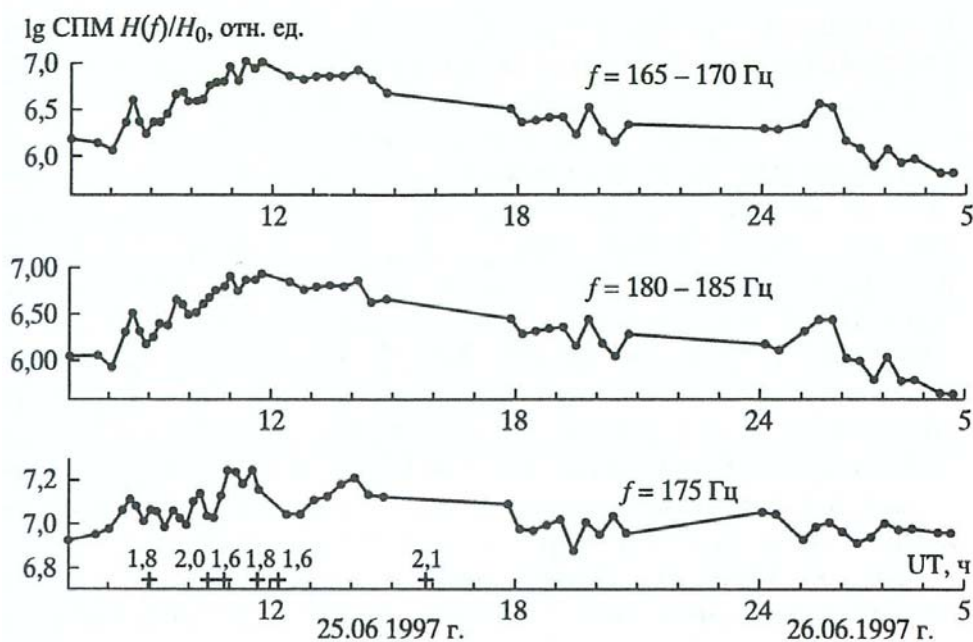


Рис. 5. Вариации сигналов магнитного поля в диапазонах частот 165-170 Гц, 180-185 Гц и на частоте 175 Гц.

Анализ характера изменения значений  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  для сигналов СНЧ-радиоустановки на частоте 175 Гц в сравнении с графиками для естественного поля в соседних диапазонах частот показывает их заметное различие в период производства взрывов (с 9:00 до 14:00). С другой стороны, между собой графики  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  для диапазонов частот 165-170 и 180-185 Гц в этот период времени различаются мало. Приведенный рис. 5 наглядно иллюстрирует аномальные изменения сигналов СНЧ-радиоустановки, вызванные ионосферными возмущениями после произведенных взрывов.

В данном эксперименте была использована аппаратура с разрешением по частоте 0.1 Гц, и сигналы СПМ  $H(f)/H_0$  СНЧ-радиоустановки выделялись с превышением около одного порядка на фоне естественного переменного магнитного поля. Для более однозначного анализа аномальных изменений магнитного поля СНЧ-радиоустановки была выполнена дополнительная обработка данных: из каждого значения сигнала на частоте 175 Гц был вычтен соответствующий уровень сигнала естественного переменного магнитного поля, взятый как среднее между интервалами частот 165-170 и 180-185 Гц, и на рис. 6 показаны разностные значения  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$ . На этом рисунке приведены также графики  $\lg \rho_k$  и  $\varphi_z$ .

Анализ графиков показывает, что в период с 7:00 по 9:00 25 июня фоновая обстановка характеризуется плавным повышением уровня  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$ , которому соответствует изменение амплитуды магнитного поля на 12%, и достаточно стабильными значениями  $\varphi_z$  (в пределах  $0.5^\circ$ ). Реакция ионосферы на воздействие единичного взрыва может быть оценена на основе рассмотрения особенностей изменения сигнала СНЧ-радиоустановки в период с 9:00 до 10:26 (время следующего взрыва). После взрыва в 9:00 начало изменений сигнала СНЧ-радиоустановки проявилось спустя 20 мин (точки 9:20-9:30) в уменьшении значений  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  (амплитуда поля уменьшается примерно на 15%). Через 40 мин (9:40-9:50) уменьшение амплитуды поля составляло 20%. Возвращение графика  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  на прежний уровень произошло спустя 1 ч после взрыва (10:00-10:10). Последующие две точки на рассматриваемом графике (10:20-10:30) характеризуют повторное понижение значений  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  (до 27% от исходного уровня амплитуды магнитного поля). На характер последующих изменений сигнала уже оказывает влияние взрыв в 10:26. Вариации фазы импеданса составляют в данном случае 2-3%, причем эти аномальные изменения проявляются с запаздыванием на 1.5 ч по сравнению с графиком  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$ . На графике  $\lg \rho_k$  также наблюдаются определенные изменения в периоды с 9:20 до 10:00 и с 11:00 до 12:00. Вместе с тем его сопоставление с графиками  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$  свидетельствует о меньшей информативности кажущегося сопротивления при изучении ионосферных эффектов от промышленных взрывов.

Таким образом, возмущение ионосферы после взрыва проявляются в виде цуга колебаний значений  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  с периодом около 1 ч и глубиной модуляции по амплитуде магнитного поля 15-27%.

Колебания такого периода в ионосфере соответствуют внутренним гравитационным волнам (ВГВ), с которыми связывается большинство явлений, наблюдаемых в ионосфере перед землетрясениями.

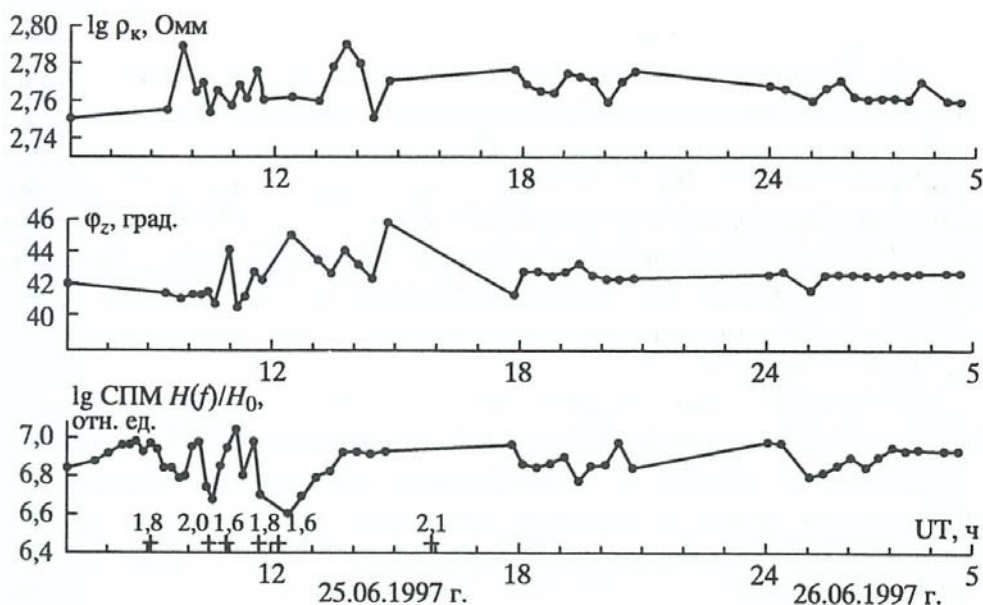


Рис. 6. Вариации регистрируемых параметров на частоте 175 Гц.

На графике  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  в период времени после серии взрывов наблюдаются колебания с понижением значений амплитуды магнитного поля на 35%. Широкий минимум в интервале с 11:40 до 13:20 соответствует, вероятно, суммарному действию нескольких взрывов. Для интервала с 17:40 25 июня по 4:40 26 июня при отсутствии взрывов характерно достаточно спокойное поведение графиков  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  и  $\varphi_z$ , причем как и в предыдущем эксперименте, фаза импеданса меняется в меньшей степени.

#### Выводы

В результате выполненных экспериментальных исследований установлена существенная зависимость вариаций сигналов СНЧ-радиостановки "Зевс" от ионосферных возмущений, вызванных наземными промышленными взрывами вблизи точки наблюдения, источника и трассы распространения поля. Для частоты 80 Гц изменения амплитуды магнитного поля составляют при этом 20-25%, фазы импеданса - 1-1.5°. Для частоты 175 Гц соответствующие изменения равны 15-35% и 2-3°. Амплитуда импеданса оказалась менее информативной при изучении ионосферных эффектов от взрывов.

Характер изменения графиков  $\lg \text{СПМ } H(f)/H_0$  после взрывов имеет вид цуга колебаний с периодом около 1 ч. Под действием взрывов изменяется положение нижней границы ионосферы и высоты волновода, что приводит к модуляции измеряемых сигналов СНЧ-радиостановки. Возникающие в ионосфере колебания такого периода, наблюдаемые также перед землетрясениями [9], соответствуют ВГВ.

Полученные результаты показывают перспективность использования СНЧ-радиостановки "Зевс" для мониторинга наземных промышленных и подземных ядерных взрывов, а также ионосферных процессов, возможно связанных с землетрясениями. Дальнейшее развитие комплекса позволяет установить приемную аппаратуру для наблюдений на Камчатке, Сахалине, Аляске, в Японии и Китае.

#### Список литературы

1. Гохберг М.Б., Похотелов О.А. О роли наземно-космических радиофизических методов для проблемы прогноза землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью наземно-космических методов (тез. докл.). М: ОИФЗ РАН. 1997. С. 6.
2. Шалимов С.Л., Гохберг М.Б. Неоднородности ионосферы сейсмически активных регионов, обусловленные прохождением атмосферных гравитационных волн, генерируемых в эпицентральной зоне // Наст, сборник. С.99-109.
3. Альперович Л.С., Гохберг М.Б., Дробжев В.И., Троицкая В.А., Федорович Г.В. Проект МАССА - исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях // Физика Земли. 1985. №11. С. 5-8.
4. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / Под ред. М.Б. Гохберга. М.: ИФЗ АН СССР, 1988. 243 с.

5. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона // Докл. РАН. 1994. Т. 338, № 1.С. 106-109.

6. Сараев А.К., Пертель М.И., Малкин З.М. Проявление деформаций земной коры, вызванных приливами, в изменениях электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Вопросы геофизики. Вып. 35. СПб.: Изд-во С-Петербургского ун-та, 1998. С. 137-149. (Уч. зап. СПбГУ; № 433).

7. Pertel M.I., Prokofjev V.E., Saraev A.K. ACF-2.2 hardware-software systems for AMT and ELF soundings // 8th Scientific Assembly of IAGA (Abstract of communication). Sweden: University of Uppsala, 1997.

8. Сараев А.К., Косткин П.М., Ивочкин В.Г. Особенности поляризации электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Физика Земли. 1998. №7. С. 50-55.

---

---

**Saraev A.<sup>1</sup>, Pertel M.<sup>1</sup>, Kocherov A.<sup>1</sup>, Kharlamov M.<sup>1</sup>, Zhao G.<sup>2</sup>, Tang J.<sup>2</sup>, Wang J.<sup>2</sup>, Deng Q.<sup>2</sup>, Zhao J.<sup>2</sup> (2000) Measurements of electromagnetic field generated by the Russian ELF transmitter in China at the distance of 7000 km // 15th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, August 19-26, 2000, Cabo Frio, Brazil, page 140. /theses/**

<sup>1</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia, aks@AS1002.spb.edu

<sup>2</sup>Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China

In 1999 an unique experiment on measurements of electromagnetic field generated by the Russian ELF transmitter "Zeus" in China at the distance of 7000 km from the source was carried out. The objective of the experiment was to study the possibility to use this source for electromagnetic investigation at a long distance. The ELF transmitter is located on the Kola Peninsula in the north-western part of Russia. The harmonically varying current in the antenna can reach 300 A. The measurements were carried out using the ACF-2.2 hardware-software complex developed in St. Petersburg State University. As a result of the experiment the signals of electrical and magnetic fields generated by the ELF transmitter at frequency of 80 Hz were detected confidently. Spectral power density of signals exceeded levels of the natural electromagnetic field 250 times at the used spectral resolution of 0.00032 Hz. The measurements were carried out under unfavorable noise condition in an urban area. The coherence between signals of natural electrical and magnetic fields at the adjacent frequencies was 0.1-0.5, while for ELF transmitter's signals the coherence exceeded the value of 0.95. As a result of the experiment the use of the ELF transmitter for electromagnetic soundings and earthquake prediction in China has been shown to be very promising.

---

---

**Сараев А.К.<sup>1</sup>, Пертель М.И.<sup>1</sup>, Кочеров А.Б.<sup>1</sup>, Косткин П.М.<sup>1</sup>, Харламов М.М.<sup>1</sup>, Гуозе Чжао<sup>2</sup>, Джи Танг<sup>2</sup>, Кванху Денг<sup>2</sup>, Джунменг Чжао<sup>2</sup>, Джиюн Ванг<sup>2</sup> (2004) Оценка возможностей геофизического использования сигналов российской СНЧ-радиоустановки «Зевс» в Китае // Вопросы геофизики. Вып. 36. СПб., 2004 - (Ученые записки СПбГУ; № 434). С. 102-108.**

<sup>1</sup>Институт земной коры СПбГУ, С.-Петербург, aks@AS1002.spb.edu

<sup>2</sup>Китай

В Санкт-Петербургском государственном университете проводятся экспериментально-теоретические исследования низкочастотных электромагнитных полей мощных источников с дальним действием в сотни-тысячи километров, нацеленные на разработку технологий применения этих источников для электромагнитных зондирований и мониторинга сейсмической активности. Источником такого типа является российская сверхнизкочастотная (СНЧ) радиоустановка "Зевс", расположенная на севере Кольского полуострова (рис. 1). Она состоит из генератора гармонически изменяющегося тока и горизонтальной, ориентированной в широтном направлении и заземленной на концах антенны (линии электропередач - ЛЭП) длиной около 60 км. Значение тока в антенне может достигать 300 А. Рабочий диапазон частот - от десятков до сотен герц.

СНЧ-радиоустановка "Зевс" является новым источником, используемым для проведения электромагнитных зондирований (измерения на нескольких частотах), электромагнитного профилирования или мониторинга при прогнозировании землетрясений (измерения на одной частоте). Отличительными особенностями данного источника являются его значительное дальнее действие и излучаемое гармонически изменяющееся поле, для которого более полно, по сравнению, например, с импульсными полями, разработана методика интерпретации данных. Перспективы использования СНЧ-радиоустановки при прогнозировании землетрясений и ее преимущества перед другими источниками подробно рассмотрены в работе [1]. Для оценки перспектив использования СНЧ-радиоустановки в геофизике представляет интерес выявить возможности измерения ее сигналов в различных регионах России и других странах.

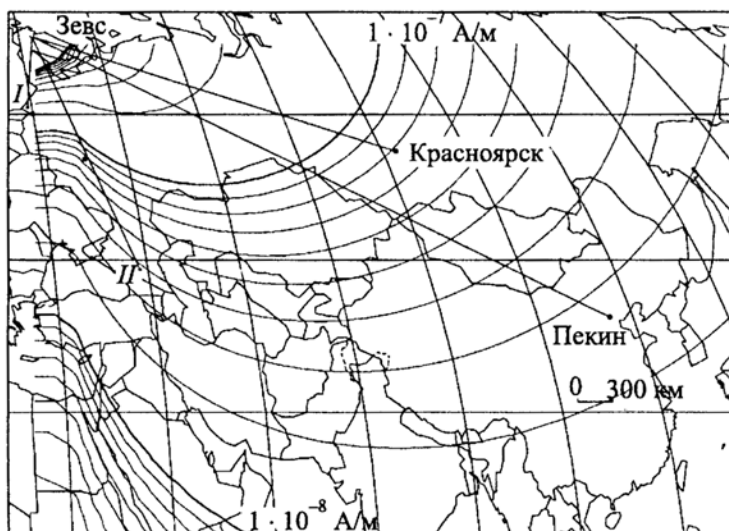


Рис. 1. Схема расположения СНЧ-радиостановки "Зевс" и районов, где измерялись сигналы данного источника: С.-Петербург (I), Северный Кавказ (II), Красноярск, Пекин. Изолиниями показаны уровни напряженности горизонтальной составляющей магнитного поля.

Для решения геофизических задач и прогнозирования землетрясений могут быть созданы специализированные СНЧ-источники такого типа. При их создании необходимо выполнить комплекс работ, включающий в себя полевые геофизические исследования по выбору площадки для размещения антенны и участков для обустройства заземлений, строительство антенной системы (ЛЭП), изготовление генератора и запуск радиостановки в эксплуатацию. Эти работы требуют значительных материальных затрат, поэтому важной задачей для эффективного использования СНЧ-источников в геофизике является оценка их дальнего действия или района обслуживания.

Существующие методы расчета зон обслуживания источниками такого типа дают возможность оценить уровни их сигналов при различном удалении от источника и заданном уровне естественного электромагнитного поля. Однако в районах планируемого

использования СНЧ-источников для целей геофизики уровень и особенности изменения естественного электромагнитного поля могут заметно отличаться от его осредненных характеристик, используемых при расчетах. Кроме того, уровни промышленных помех могут быть различными, и для оценки дальнего действия таких источников необходимы измерения их сигналов на различном удалении и при различном уровне промышленных помех.

Дальнее действие СНЧ-радиостановки "Зевс" при радиосвязи составляет более 10000 км. При этом обычно измеряется одна из составляющих электромагнитного поля без особых требований к точности определения амплитуды и фазы сигнала. В 1990 г. измерения поля данного источника были выполнены американскими исследователями в ряде районов мира, в том числе в Антарктиде на удалении 18 300 км [2]. В этих экспериментах регистрировалась только одна горизонтальная составляющая магнитного поля и для обеспечения уверенного приема сигнала использовалось накопление по ряду (более 1000) одномоментных сеансов измерений. При геофизическом использовании СНЧ-источников задачей работ является не только регистрация сигнала, а измерения, по крайней мере, двух составляющих электрического и магнитного полей с высокой точностью и определением амплитуды и фазы импеданса.

Для решения геофизических задач с использованием мощных СНЧ-источников в СПбГУ было разработано несколько модификаций приборов из серии аппаратуры корреляционных функций (АКФ) и проведен ряд экспериментальных измерений в различных регионах России.

В 1995 г. были выполнены экспериментальные исследования электромагнитного поля СНЧ-радиостановки для мониторинга сейсмической активности на Северном Кавказе на расстоянии 2700 км от источника [3]. По результатам работ была показана возможность уверенной регистрации сигналов при помощи широкополосной аппаратуры АКФ-2 методом аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ) с разрешением по частоте 0.1 Гц. На рис. 2, а приведен пример регистрации спектральных плотностей мощности (СПМ) сигналов электрического и магнитного полей на частоте 125 Гц. СПМ сигналов превышала уровни естественного электрического и магнитного полей в пять раз, а точность определения импеданса, оцененная относительно повторных измерений, находилась в пределах 2-3%.

В 1996 г. была создана специализированная аппаратура АКФ-2.2, предназначенная для проведения работ методом АМТЗ и для сверхнизкочастотных зондирований (СНЧЗ) с измерениями электромагнитных полей искусственных источников СНЧ-диапазона частот [3]. В аппаратуре предусмотрены широкополосный (работы методом АМТЗ) и узкополосный (работы методом СНЧЗ) режимы работы. Реализованы регистрация корреляционных функций и прямая запись полей как в широкой, так и в узкой полосе. С использованием нового узкополосного режима существенно повысилось спектральное разрешение, и СПМ сигналов СНЧ-радиостановки регистрируются с превышениями над уровнем естественного электромагнитного поля на два порядка более контрастно, чем в обычном широкополосном режиме, что позволяет существенно (в 5-10 раз) повысить точность измерений импеданса поля СНЧ-радиостановки.

С помощью аппаратуры АКФ-2.2 были выполнены измерения электромагнитного поля СНЧ-радиостановки в ряде районов России. Примеры регистрации для точек вблизи С.-Петербурга (950 км от источника) и Красноярска (3200 км от источника) приведены на рис. 2, б. Превышение СПМ сигналов

электрического поля над уровнем естественных полей при использовавшемся спектральном разрешении 0,007 Гц составляли для С.-Петербурга 160, а для Красноярска 70 раз. Такое соотношение амплитуд СПМ сигналов СНЧ-радиоустановки соответствует расчетным значениям сигналов и диаграмме направленности данного источника с максимальной величиной поля вдоль антенны (см. рис. 1). Расчеты выполнены с использованием программных средств, детально рассмотренных в работе [4].

В 1999 г. с помощью разработанных в СПбГУ двухканальной аппаратуры АКФ-2.2 и четырехканальной аппаратуры АКФ-4 был выполнен эксперимент по измерению электромагнитного поля российской СНЧ-радиоустановки в Китае на расстоянии 7000 км от источника. Район экспериментальных работ находился в направлении максимума диаграммы направленности СНЧ-радиоустановки (см. рис.1). Работы были выполнены в ряде точек в районе Пекина. Измерялись горизонтальные составляющие электрического поля с помощью заземленной приемной линии длиной 100 м и магнитного поля с помощью индукционной антенны. Ориентировка приемной установки (электрическая антенна по азимуту 350°, магнитная антенна по азимуту 80°) соответствовала максимальным значениям сигналов СНЧ-радиоустановки.

На рис. 3 представлены результаты измерений магнитного поля СНЧ-радиоустановки на частоте 80 Гц в точке Баоди. Данный рисунок иллюстрирует влияние используемого спектрального разрешения на контрастность выделения полезного сигнала, т. е. превышение СПМ сигнала над уровнем естественного магнитного поля. Для использовавшегося режима узкополосной регистрации временных рядов (в полосе 2 Гц) со спектральным разрешением 0,0264 Гц это превышение составляло 3 раза, для 0,00258 Гц — 20 раз и для 0,00032 Гц — 250 раз. Таким образом, используемый в приемном аппаратурно-программном комплексе АКФ-2.2 узкополосный режим и реализованное спектральное разрешение обеспечивают уверенный прием сигналов СНЧ-радиоустановки в Китае на расстоянии 7000 км от источника.

Измерения в данном эксперименте выполнялись непосредственно в населенных пунктах при значительном влиянии промышленных помех. Рис. 3 показывает характер изменения СПМ электрического и магнитного полей, зарегистрированных в точке Хиджи при помощи аппаратуры АКФ-4 в широкой полосе 5-180 Гц с разрешением по частоте 0,66 Гц. Как видно из рисунка, помимо сигналов гармоник 50 и 150 Гц в спектре наблюдается достаточно широкий максимум в районе 100 Гц, оказывающий влияние на интервал около 80 Гц, где измерялся полезный сигнал. Однако, несмотря на неблагоприятные условия, сигналы СНЧ-радиоустановки регистрировались очень уверенно во всех точках измерений со значительным превышением над уровнем помех и естественных электромагнитных полей. Это показано на рис. 4, а для точек Баоди, Хиджи и Джиксиан, где превышение полезного сигнала при спектральном разрешении 0.00258 Гц составляло 15-20 раз.

При высоком уровне промышленных помех измерения естественных электромагнитных полей часто не обеспечивают необходимой точности определения импеданса. Использование сигналов искусственных источников при этом более перспективно, особенно при мониторинге сейсмической активности, когда требуется высокая точность измерений. На рис. 4, б показано сопоставление СПМ сигнала СНЧ-радиоустановки и естественного электрического поля с параметром когерентности сигналов электрического и магнитного полей  $G$ , который характеризует точность определения импеданса. Как видно из рисунка, для естественного поля значение  $G$  меняется в пределах 0,1-0,5, в то время как для сигналов СНЧ-радиоустановки  $G=0,95$ .

Выполненные в Китае измерения сигналов российской СНЧ-радиоустановки "Зевс" при помощи аппаратурно-программного комплекса АКФ-2.2 показали перспективность геофизического использования данного источника на расстоянии до 7000 км. Были уверенно зарегистрированы сигналы электрического и магнитного полей на частоте 80 Гц. Для реализуемого спектрального разрешения 0.00032 Гц получено

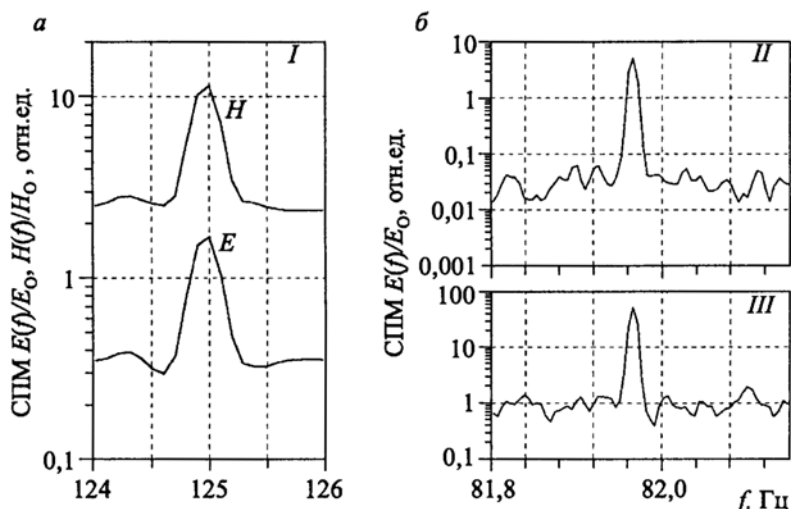


Рис. 2. Примеры регистрации СПМ сигналов электрического поля СНЧ-радиоустановки с использованием аппаратуры АКФ-2 со спектральным разрешением 0,1 Гц на Северном Кавказе (I) и аппаратуры АКФ-2.2 со спектральным разрешением 0,007 Гц в районе С.-Петербурга (II) и Красноярска (III).

превышение спектральной плотности мощности сигналов над уровнем естественного электромагнитного поля в 250 раз. Показаны преимущества использования полей СНЧ-радиоустановки по сравнению с измерениями естественных электромагнитных полей в районах с высоким уровнем промышленных помех.

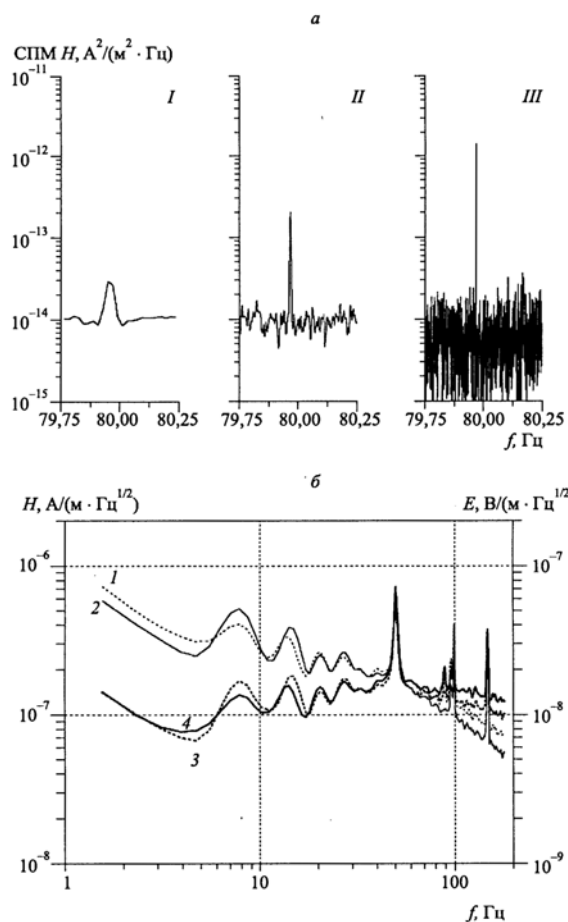


Рис. 3. Сравнение СПМ сигналов магнитного поля СНЧ-радиоустановки в районе Пекина (а) при разном спектральном разрешении (I - 0,0264; II - 0,00258; III - 0,00032 Гц) и характер изменения магнитного и электрического полей в точке Хиджи в диапазоне частот 5-180 Гц (б) (1, 2 - H (аз. 260 и 350°); 3, 4 - E (аз. 260 и 350°)). Спектральное разрешение 0,00258 Гц.

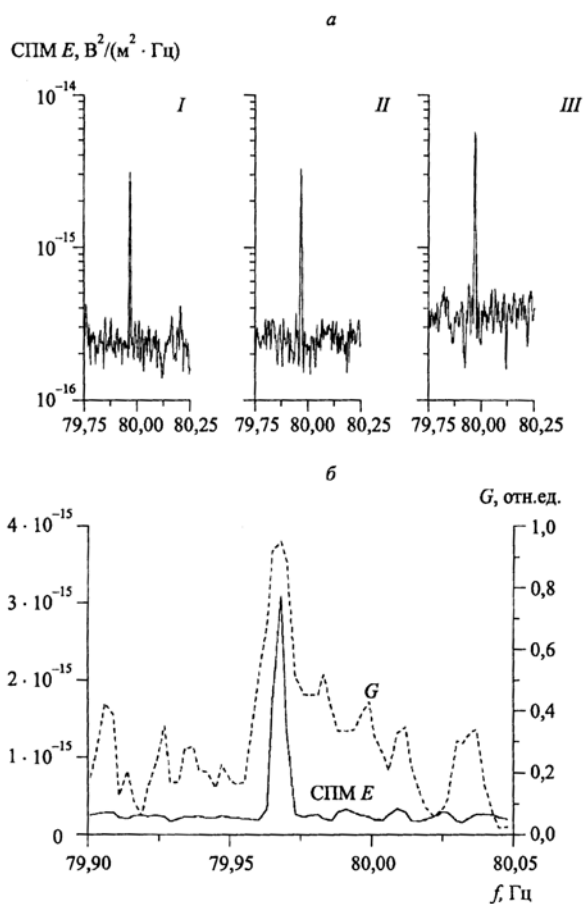


Рис. 4. Сравнение СПМ электрического поля СНЧ-радиоустановки в различных точках (а): Баоди (I), Хиджи (II), Джиксиан (III) и сопоставление СПМ электрического поля и когерентности  $G$  для сигнала СНЧ-радиоустановки и естественного электрического поля (б). Спектральное разрешение 0,00258 Гц.

#### Список литературы

1. Сараев А. К., Пертель М. И., Парфентьев П. А. и др. Экспериментальные исследования электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки для целей мониторинга сейсмической активности на Северном Кавказе // Изв. РАН. Физика Земли. 1999. Вып. 2. С. 17-24.
2. Fraser-Smith A. C, Bannister P. R. Reception of ELF signals at antipodal distances // Radio Science. 1998. Vol.33. N1. P.83-88.
3. Pertel M.I., Prokofjev V.E., Saraev A.K. ACF hardware-software system for AMT and ELF soundings // 8th Scientific Assembly of IAGA. Uppsala. Sweden, 1997. P. 38.
4. Сараев А.К., Косткин П. М. Структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Вопросы геофизики. Вып. 35. СПб., 1998. С. 117-135.

**Ermakova E. N.<sup>1</sup>, Kotik D. S.<sup>1</sup>, Polyakov S. V.<sup>1</sup>, Bosinger T.<sup>2</sup>, and Sobchakov L. A.<sup>3</sup> (2006)**  
**A power line as a tunable ULF-wave radiator: Properties of artificial signal at distances of 200 to 1000 km.** // J. Geophys. Res., VOL. III, A04305, doi:10.1029/2005JA011420, 2006.

<sup>1</sup>Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia, E-mail: kotik@nirfi.sci-nnov.ru

<sup>2</sup>Department of Physical Sciences, University of Oulu, Oulu, Finland.

<sup>3</sup>Russian Institute of Power Radiobuilding, St. Petersburg, Russia.

A power line of 108 km length in the Kola Peninsula, Russia, was fed by a tunable AC current in the upper ULF and lower ELF frequency band. Its magnetic signature was received by the Finnish chain of pulsation magnetometers at distances from 200 to 1000 km from the source. Amplitudes and polarization properties were analyzed as a function of frequency, distance, line-of-sight angle, and local time. Some evidence was obtained that, beside the geological structure underneath the radiator, also different ionospheric conditions affect the received signal properties in a systematic way. The efficiency of the power line as an ULF-wave radiator proved to exceed largely those typically obtained in similar experiments based on modulation of ionospheric currents by powerful HF heating.

### 1. Introduction

It is well known that power line radiation (50 and 60 Hz) fills the entire Earth's atmosphere up to deep into space, hereby changing the natural electron distribution in the magnetosphere via electron-wave interaction. Power line radiation produces and modifies a great variety of wave and particle phenomena (for a recent review, see Parrot and Zaslavski [1996, and references therein]) and can be considered as a kind of global pollution with consequences we cannot give an account of in all details and full amount.

Contrary to this side effect of our technical world and industrial civilization, we could use power line radiation also as a scientific tool in a well defined manner under controlled conditions. In the first place we are not fixed to 50 or 60 Hz and could choose the frequency freely. The basic idea is very simple: hire a commercial power line of let us say 100 km length and feed to it an AC current of desired strength and frequency. The technical and geologic requirements for high ELF/ULF transmission efficiency are, however, not so easy to meet. The underlying Earth's crust conductance should be low, and even more important, antenna and generator should have a good electrical grounding (cf. Fig.1). Both requirements are fairly well met in case of the Kola-Serebryansky power transmission line in Russia. The Kola shield belongs to the oldest on the globe and the good grounding is guaranteed by a water power station at one end of the power line (where the generator is located).

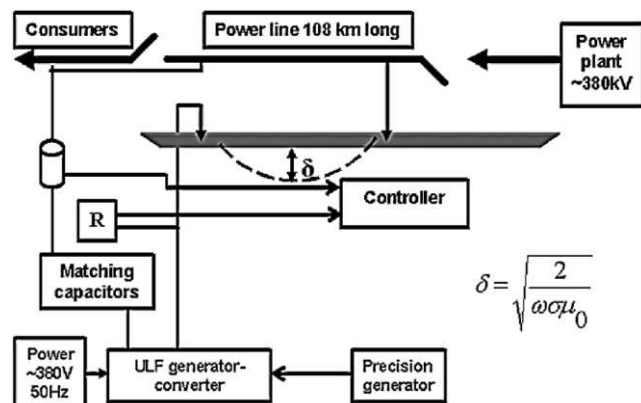


Fig. 1. Schematics of the ULF-transmitter.

First experiments of the given kind were, however, not carried out in Russia but in USA at the Wisconsin Test Facility [Bannister et al., 1974], known as the Project Sanguin. A more rigorous search for historical forerunners revealed an attempt in Sweden of geoelectric probing of the Earth's crust using a power line as antenna. It dates back as far as 1946 [Lundholm, 1946]. To some extent, power line usage for magneto sounding was also tried here and then in Northern America, Southern Africa, and former USSR [Cantwell et al., 1965; Samson, 1969; Van Zijl, 1969; Blohm et al., 1977; Sapugak and Enenstain, 1980].

Russian research groups developed and systematized this method doing experiments either in the VLF range [Velichov et al., 1994] or in the ULF range [Belyaev et al., 1997, 2002] with main emphasis on ionospheric investigations. All experiments (which still continue) have shown that the transmission efficiency in the ULF range exceeded by far what has been able to achieve by high power HF periodic heating of the ionosphere [cf. Bosinger et al., 2000, and references therein]. Power line transmitted artificial signals in the 1 Hz frequency range were detected over distances of more than 1500 km, a result which was never reported in case of heating experiments (the ULF signals were only detected under the heated region) [Belyaev et al., 1987; Stubbe, 1996].

In spite of such a clear strategy and an attractive scientific objective, power lines have been only little used in a controlled fashion, at least in the ULF range. This is partially due to practical difficulties. It is not so easy to feed an AC current of, e.g., 1 Hz efficiently into the line (see above) but even more severe is the little confidence in the scientific community that something can be achieved beyond just the trivial effect, detecting the primary field. It is one objective of this paper to show that the ionosphere has, depending on distance, indeed an effect on the received artificial signal. This is shown here not for the first time [cf. Belyaev et al., 1997, 2002] but it is for the first time that extended use is made of the Finnish chain of pulsation magnetometers which are located in an intermediate range of distances with respect to the ULF wave radiator. It allows one to investigate the transition from near to far field. A study of the longest

distance reception properties is kept for a separate paper. It may, however, be mentioned that in the experiment analyzed here the artificial signal was detected in Spitzbergen located in the polar cap and on at a river side of Volga, in midlatitude Russia, 500 km southeast of Moscow. Thus the artificial signal was received over an area of 3000 km in diameter.

The paper is organized as follows: In section 2 details are given of the campaign, the experimental setup, and data processing, in section 3 some basic theoretical concepts are reviewed, in section 4 the observational findings are presented. Section 5 closes the paper with a discussion and a summary.

## 2. Arrangements, Equipment, Observation Points, and Data Processing

Disconnecting a power line for several days from the providers and consumers of electric power requires considerable efforts on the legal, financial, and practical side. It can only be carried out on some campaign basis. This paper deals with the result of a campaign carried out from 27 September till 3 October 2001.

### 2.1. Transmitter and Its Surrounding

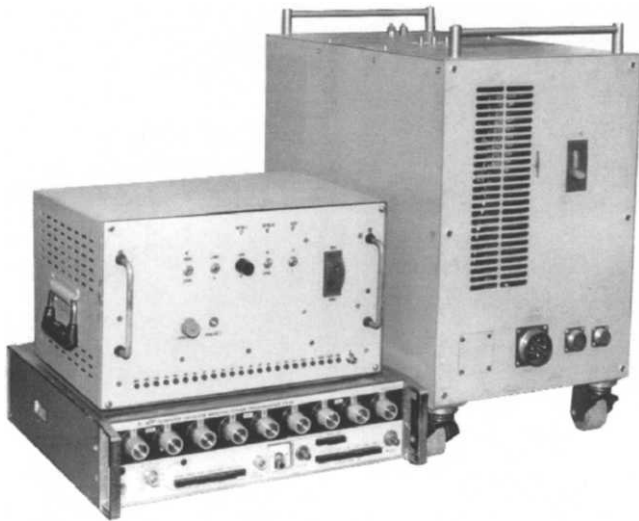


Fig. 2. The 50 kW ULF generator.

The basic concept of using a power line as an ULF wave transmitter is shown in Fig. 1. The Kola-Serebryansky power line was disconnected from the power plant and its consumers. A 50 kW ULF generator fed a current of up to 100 A via matching capacitors into the line. The generator makes use of powerful thyristor switching circuitry and is shown in Fig. 2. Input current and voltage amplitudes were monitored during all experiment time.

The power line in question is of 108 km in length and stretches out into the geographic east-west direction, so the axis of the corresponding magnetic dipole points toward north. The geological structure on Kola Peninsula is rather unique and is characterized by a very low

conductivity  $\sigma = 5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$  S/m (as it follows from measurements at frequencies above 30 Hz). The estimated skin depth  $\delta$  for a frequency of  $f = 10$  Hz is of the order of 8 to 10 km.

### 2.2. Observation Points

To study the spatial distribution and characteristics of the received ULF, magnetic field emitted by the transmitter the Finnish chain of pulsation magnetometers was used. The geographic location of the receiving sites and their position relative to the source field is shown in Fig. 3 and geographic coordinates, etc., are given in Table 1 (the station KEV shown in the figure was out of operation during the time of the experiment but it is part of the Finnish chain).

A triple of orthogonal search coil sensors provided the geomagnetic east-west, north-south, and vertical components of the magnetic field vector at each station with the exception of the station NUR where a vertical sensor was missing. The magnetometers are sensitive to the frequency range 0.01 to 5 Hz. Data is recorded digitally at a resolution of 16 bit with a sampling rate of 40 Hz. All instruments were equipped with a GPS clock. Raw data was processed to correct for the frequency and phase response of the instruments.

### 2.3. Campaign Strategy and Data Processing

The campaign took place from 27 September to 3 October 2001 at daytime and nighttime. Various patterns of time schedules and frequency sweeps were implied. They can be divided in two categories, either a set of fixed

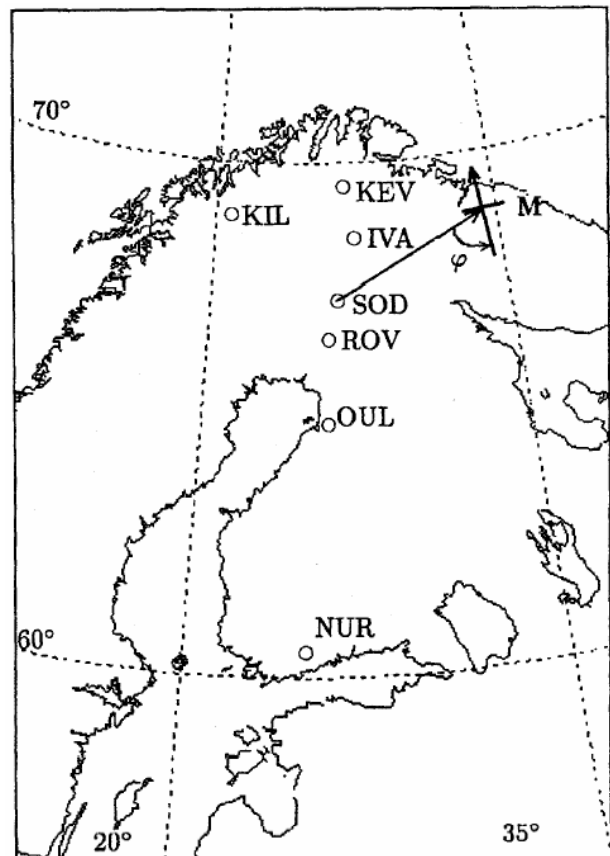


Fig. 3. Geography of the experiment.



frequencies from 0.6 to 15 Hz band or a continuous frequency sweep with small increments. After judging the quality of the data, 4 out of 6 days were selected for a detailed data analysis. Daytime conditions were 30.09.01, 0800-1200 UT, 1.2-3.0 Hz, 0.1 Hz increment, 10 min at each frequency. Nighttime conditions were 27.09.01, 01.10.01, and 02.10.01, 2000-2300 UT, 0.6-4.2Hz, 0.2 Hz increment, 10 min at each frequency, and three sweeps.

Table 1. Names and Coordinates of Observation Points and Their Distances to Radiation Facility

Station		Position		Distance to Source, km	Angle $\varphi$ to Source
Name	Code	Lat	Long		
Kilpisjärvi	KIL	69.0	20.7	547	85.05
Ivalo	IVA	68.6	27.4	286	80.71
Sodankylä	SOD	67.4	26.5	367	60.06
Rovaniemi	ROV	66.6	25.8	477	53.87
Oulu	OUL	65.0	25.5	578	38.26
Nurmijärvi	NUR	60.5	24.7	1032	22.23

Data processing implied calculation of power spectra from 100 s of data with spectral resolution of 0.01 Hz and subsequent averaging over the 10 min period of signal radiation. Power spectra of linear as well as circular polarization were calculated, i.e., east-west and south-north components, and left-handed and right-handed circularly polarized components.

### 3. Theoretical Background

Let us consider the power line as a magnetic field source in a highly resistive half space (atmosphere) formally represented as a magnetic dipole where the power line's length  $L \ll \lambda$ ,  $\rho$  (with  $\lambda$  the wave length in free space and  $\rho$  the distance to the observation point). As in Fig. 4 we put the  $X$  axis pointing into east-west and  $Y$  axis into the south-north directions, define  $\varphi$  as the angle between the  $Y$  axis and the direction to the observation point, name  $h$  the thickness of the waveguide and have the magnetic field  $H$  laying in the  $ZY$  plane).

Under the assumption of finite conductivity of the half space underneath the antenna the magnetic momentum  $M$  of the source can be expressed as:

$$M = \frac{IL}{\sqrt{2}} \delta \quad (1)$$

Here  $L$  is the length of the current line,  $I$  is the current amplitude, and  $\delta = \sqrt{2/\omega\sigma\mu_0}$  is the skin depth as expressed in conventional notation.

The near field ( $\rho \leq L$ ) can be calculated by integrating along the antenna [see Terechenko et al., 2005]. In this case one has taken in account only the finite conductivity of the Earth crust and neglected the influence of the ionosphere. At distances  $\rho > h$ ,  $L$  the magnetic field in the waveguide can be easily calculated under the assumption of a perfect ground conductor because the losses in the waveguide are dictated primarily by the upper ionospheric wall [see Wait, 1972]. Note that the propagation of electromagnetic waves in the ELF frequency range within the Earth-ionosphere waveguide in case of a homogeneous and isotropic ionosphere was investigated by Bannister et al. [1974]. Sobchakov et al. [2003] in turn investigated the case of an anisotropic and homogeneous upper wall for ULF frequencies.

Following Sobchakov et al. [2003], on the surface of the Earth the orthogonal magnetic field components are given by

$$H_\varphi = \frac{iM \sin \varphi}{2\pi\rho^2 h} \left[ 1 - \frac{i\beta}{k_0 h} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$H_\rho = \frac{iM \cos \varphi}{2\pi\rho^2 h} \left[ 1 - \frac{i\beta}{k_0 h} \right]^{-1} \beta = \frac{Z_{YX} - Z_{XY}}{2 \cdot Z_0} \quad (3)$$

where  $H_\rho$  and  $H_\varphi$  are the magnetic field components parallel and perpendicular to the radius vector from the source to the observation point,  $M$  as given by formula (1), symbols  $h$  and  $\rho$  as used above,  $Z_{YX}$ ,  $Z_{XY}$  are the horizontal

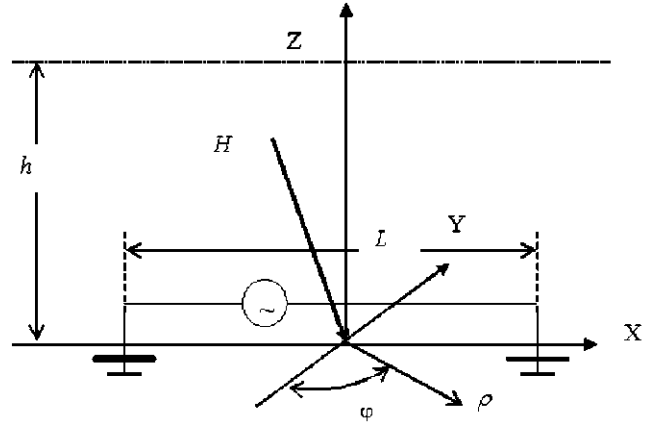


Fig. 4. Coordinate system for calculations of the radiation from power line.

components of the ionospheric impedance tensor in case of an anisotropic and nonhomogeneous ionosphere,  $Z_0 = 120\pi[\text{Ohm}]$  is the impedance of free space,  $k_0$  is the wave number of free space. In case of an anisotropic but homogeneous upper wall,  $\beta$  can be replaced by  $(\beta = (1/n_1 + 1/n_2))$ , where  $n_1$  and  $n_2$  represent the refractive indexes of the normal wave modes. The formulas (2) and (3) were obtained under the conditions  $k_0\rho \ll 1$ ,  $\rho > h$ ,  $k_0n_{1,2}h \ll 1$  assuming a vertical Earth magnetic field throughout. The conditions define in fact the applicability of the impedance approach.

The signal components  $H_\rho$  and  $H_\phi$  calculated by formulas (2) and (3) were used for defining the magnetic-field absolute value  $H = \sqrt{H_\rho^2 + H_\phi^2}$ . Then the dependence of the field module on frequency for each station, and the dependence of the field module on distance for given frequencies were calculated and plotted. The components  $H_{S-N}$  and  $H_{W-E}$  were also determined from the calculated components  $H_\rho$  and  $H_\phi$  for comparing the experimental with the theoretical dependences. Besides the linear components  $H_{S-N}$  and  $H_{W-E}$ , we will consider also the right and left-handed circularly polarized field components defined by  $H_{R,L} = (H_{S-N} \pm iH_{W-E})/\sqrt{2}$ .

#### 4. Observational Results

Throughout all experiments the artificial signal was observed at all stations of the Finnish chain (cf. Fig. 2 and Table 1). As an example of the received signal, Fig. 5 shows dynamic spectrum obtained at the nearest station IVA. The operational mode of a stepping sweep in frequency is clearly and distinctly discernable above the background noise. This is true also for NUR where the signal to noise ratio is smallest. Similar dynamic spectra were obtained at all receiving points.

The observation at IVA revealed in addition harmonics above the fundamental excitation frequencies. This is not due to signal saturation at the receiving station but a product of the nonsinusoidal excitation of the current in the power transmission line (cf. Fig. 5). Such additional harmonics were not observed for more remote stations.

The values of the signal to noise ratio (SNR) were estimated for the best and worse cases using power spectra for the two stations mentioned above. Clearly, the peak power was always well above the neighboring background level. We consider in all cases the SNR large enough to avoid tedious confidence interval estimates for the spectra. In numbers SNR was of the order of 6 to 8 dB at the most remote stations NUR and OUL (cf. Table 1). This is considered enough to make reliable spectral analyses.

We first focus on the amplitude-frequency dependence of the linearly polarized magnetic field components (Fig. 6). This is done in comparison of night to day hour observations and for the station IVA (286 km) and NUR (1032 km). The night observations were from 27.09.01 and 01.10.01 and day observations from 30.09.01. All amplitudes of the received signal were normalized corresponding to constant antenna current amplitude of 100 A. As one can see from Fig. 6, upper panel, the received signal amplitude at the nearest receiving point depended only weakly on frequency if at all. This is true for both components. The discrepancy between night and day observations is negligible for the east-west component (more-or-less coinciding with the plane of the antenna current loop) and not large (at most 25% in relative units) for the north-south component. If there were no observations of 27.9.01 (night observation) for the north-south component, one would be ready to state no significant frequency dependence and no significant night to day hour dependence in the near-field of the antenna.

One is inclined to assume that the somewhat different behavior on 27.9.01 is actually due to background magnetic activity. This assumption is checked below. Note that IVA is located underneath the Polar electrojet.

As one can see from Fig. 6, lower panel, the behavior of the signal at the remote receiving point NUR differs from the one at IVA (cf. Fig. 6, upper panel). In order not to overload the figure only the east-west component is presented as showing the largest effect. For the two nighttime runs (27.9.01 and 1.10.01) a contradictory frequency dependence of the signal strength was encountered. In spite of the large spread of observation points (up to 25% in relative units), it was big enough to be considered as significant. Astonishingly, the trend was positive during night 27.9.01 and negative during night 1.10.01. One would have liked to see a great difference between the nighttime and daytime runs but this was not observed, at least as much as can be said from the few observation points of day 30.9.01.

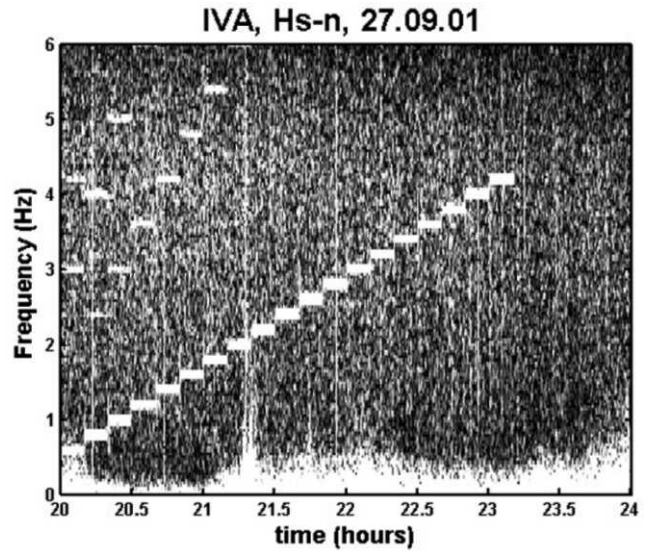


Fig. 5. Dynamic spectrum from IVA.

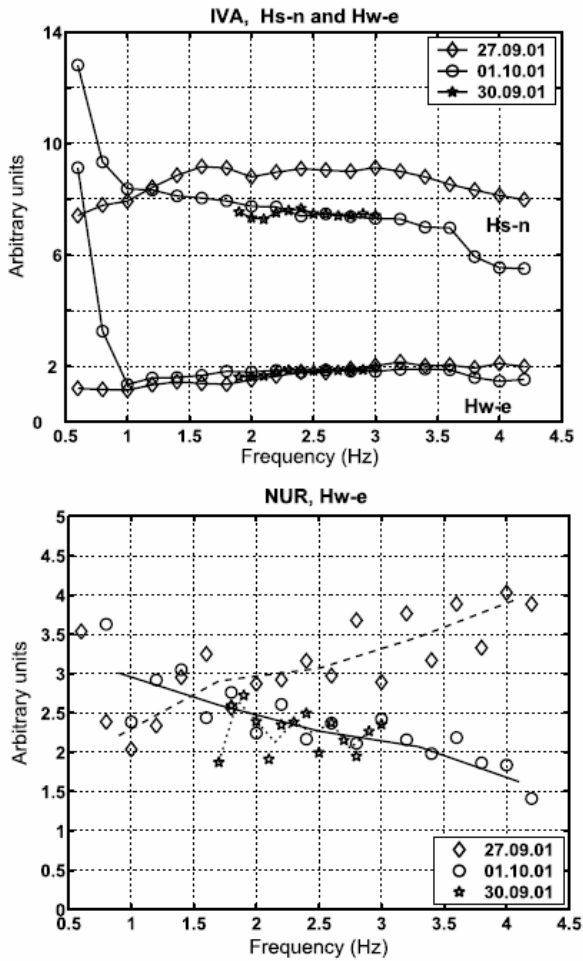


Fig. 6. The dependence of the ULF signal linear components on frequency for IVA (upper panel) and NUR (lower panel) stations during three sweep operation times.

between nighttime and daytime runs, a fact which was also realized at the station IVA. Whereas the frequency dependence could indicate an ionospheric impedance effect, the similarity between nighttime and daytime runs speaks against it. Obviously, SOD was still too close to the source in order to be sensitive enough for ionospheric modifications.

Now let us look at the station NUR: The background noise properties shown in Fig. 8, lower panel, clearly indicate an active ionosphere during the night of 27.9.01. It therefore does not come as a surprise that the artificial signal was also affected in the same way at this night as Fig.8, upper panel, can tell us. Note that this figure includes only night hour runs. The number of points is too small from the day hour experiment of 30.9.01 (cf. Fig.6, lower panel) in view of the large observational spread. Note that the trend in the frequency dependence was either negative or positive indicating a large variability in this quantity.

Closing this section, two more figures are shown which will be addressed only in section 5. In Fig.9, upper and lower panels, use is made of all experiments, also the one of night 2.10.01. Moreover, one more station, ROV, is incorporated which is located south of IVA and SOD but well north of NUR (cf. Table 1). The ratio of the two linearly polarized components (north-south and east-west) turned out to be worthy also of some consideration (see below).

An important parameter of radiated magnetic field is the ratio of right- to left-handed polarized components. This parameter is very sensitive to the anisotropic properties of the waveguide walls (both ionosphere and Earth crust) as was shown by Belyaev et al. [2002]. It is known, for instance, that the spectral resonance structure (SRS) of the ionospheric Alfvén resonator (IAR) is most distinct in the ellipticity, which is in fact the ratio of left- to right-handed circularly polarized wave components [Bosinger et al., 2004, and references therein; cf. Hayakawa et al., 2004, Fig. 1].

In order not to be fooled around by the polarization properties of the background magnetic noise superimposed on the artificial signal a similar processing is carried out for the noise alone and for the signal plus noise and shown in comparison. Fig. 7, upper and lower panels, exemplifies this kind of analysis for the station SOD (cf. Table 1). As regards the background noise Fig. 7, lower panel, shows convincingly that there was no frequency dependence and night versus day difference in the observations.

The artificial signal received at SOD exhibited a distinctly different behavior: the signal ratio  $H_R/H_L$  was clearly above unity at all operating frequencies and exhibited an increase with frequency (up to 30% in relative units). This means prevalence of  $R$  with respect to  $L$  polarization. Interestingly enough, there was no difference

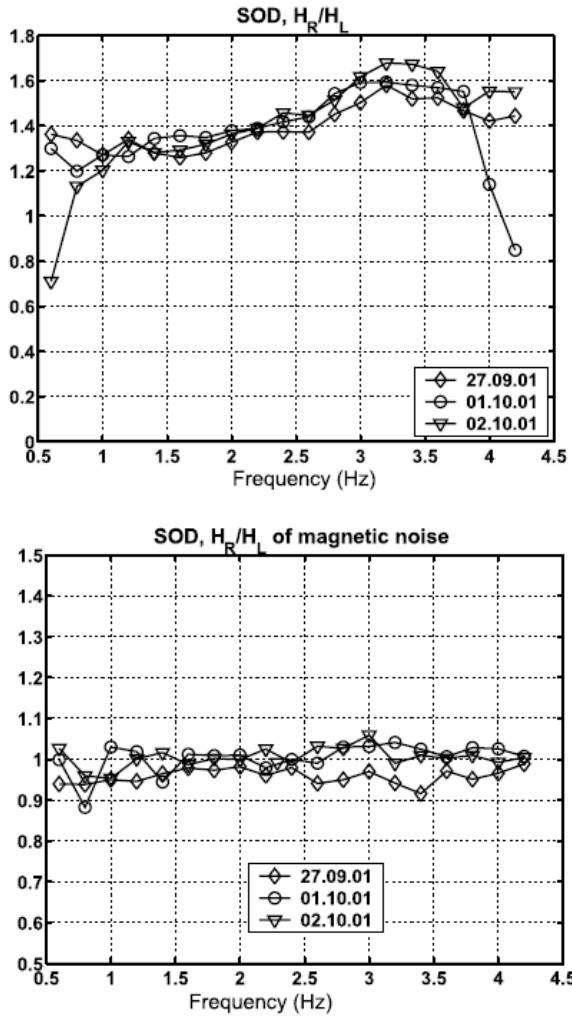


Fig. 7. The ratio of right and left hand polarized components at SOD station for signal (upper panel) and background noise (lower panel).

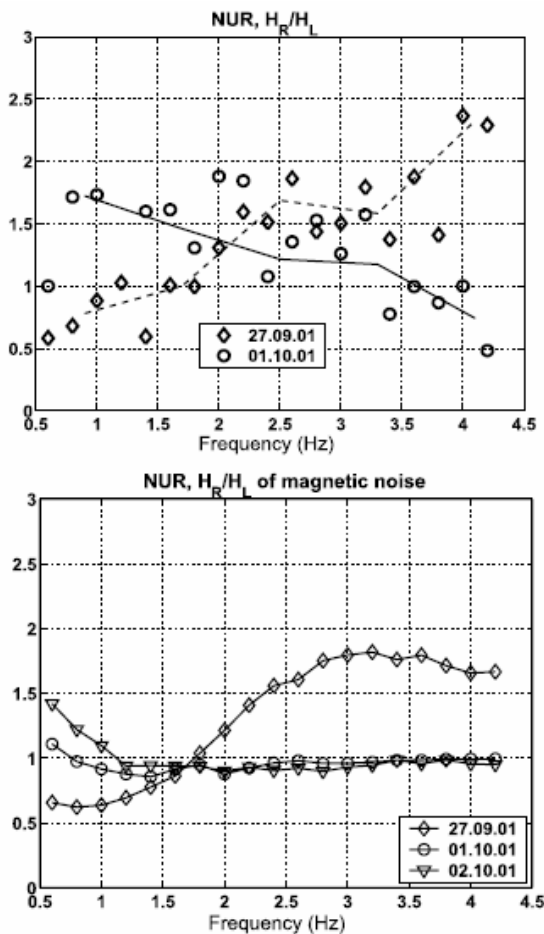


Fig.8. The ratio of right and left hand polarized components at NUR station for signal (upper panel) and background noise (lower panel).

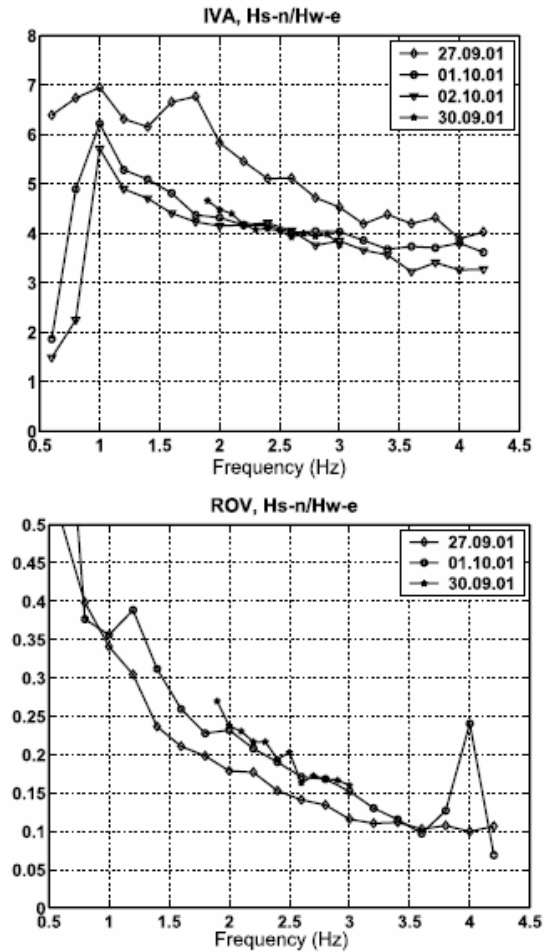


Fig. 9. The ratio of the linear components versus frequency at IVA (upper panel) and ROV (lower panel) stations for all four frequency sweep operations.

## 5. Discussion

Keeping in mind that the Kola-Serebryansky transmission power line is located inside the auroral oval, it seems necessary to give an account of the geomagnetic activity during the experiments. For this purpose the  $A_p$  index was chosen. It allows to estimating the geomagnetic field disturbance level. A histogram of this index for the Troms0 observatory is shown in Fig.10 (upper panel; cf. <http://spidr.ngdc.noaa.gov/>). As one can see the disturbance was rather weak during the operation times of 27.09.01 and 30.09.01. The night runs of 01.10.01 and 02.10.01 were carried out during prolonged medium level geomagnetic activity.

The ionospheric conditions are best probed by an ionosonde in Loparskaya, close to the transmitting facility ( $A = 68^{\circ}52'N$ ,  $\Phi = 33^{\circ}03'E$ ). The ionosonde data is shown in the middle and bottom panels of Fig.10 (cf. <http://spidr.ngdc.noaa.gov/>).

It can be concluded by the ionosonde data that the situation in the  $E$  layer during the first night (27.9.01) differed radically from the situation during the second and third nights runs (1.10.01 and 2.10.01). The latter were carried out under disturbed magnetic conditions and the ionospheric parameters were strongly affected most likely by particle precipitation. On 27.09.01 the  $E$  layer produced a rather low critical frequency (about  $\sim 1$  MHz) and exhibited a weak sporadic  $E_S$  layer  $f_{cEs} \sim 2$  MHz), but the critical frequency of the  $E$ -layer accompanied with  $E_S$  raised up to 5-6 MHz in the time period of 01.10.01 -02.10.01 and actually blanked the upper ionosphere. The data from the Tromsø dynasonde (not shown) could tell that it was not a typical and regular  $E_S$  (rather narrow) but it was a 50 km thick layer practically like a daytime  $E$  layer. It can also be concluded during the night of 01.10.01 the conditions in the  $E$  layer were very close to those of the following night on 02.10.01.

In accord with the geomagnetic and ionospheric conditions the signal characteristics obtained during the night of 01.10.01 (and actually also during the night of 02.10.01) were similar to daytime ones as obtained on 30.09.01 (cf. Fig.6). Fig.9 can serve as a kind of summary for this fact. The ratios of linearly polarized components at IVA and ROV on 27.09.01 distinctly differ from those obtained at all others days of observations. Recall that the daytime frequency dependence was close to the one obtained during nighttime under disturbed conditions.

So far we have only considered the ionospheric conditions in the vicinity of the ULF transmitter. As is known since the first midlatitude observations [Belyaev et al., 2002], the natural background magnetic polarization

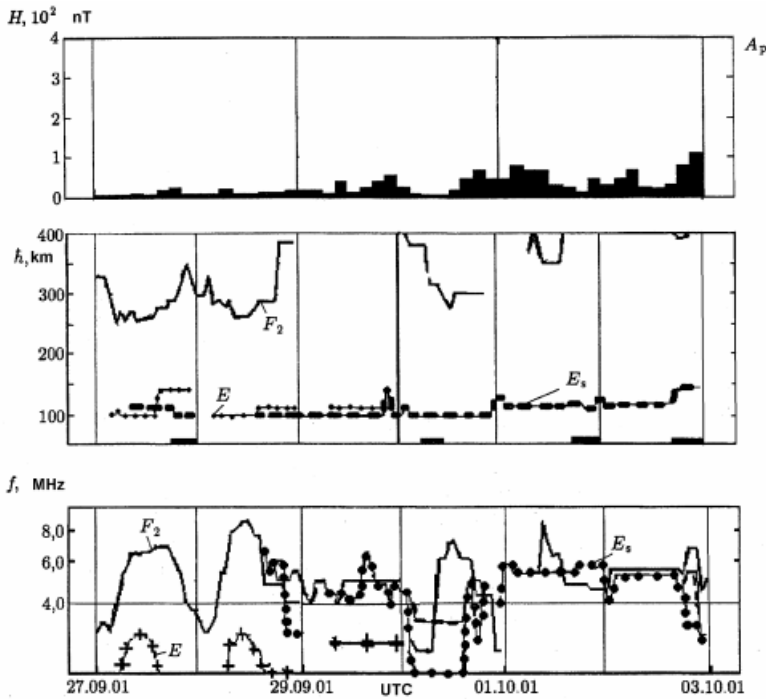


Fig. 10. Geophysical conditions close to the transmitter during the campaign (the operation time is marked by black lines at the bottom of the middle panel):  $A_p$  index (upper panel), ionosonde data at Loparskaya station, heights of layers (middle panel) and critical frequencies of  $E_S$  and  $F_2$  layers.

effect? Fig.8, upper panel (positive trend) does not allow us to draw this conclusion. We are inclined to attribute the negative trend at NUR as an artifact caused by the large spread in the observation points. The interpretation of the case during the night of 27.9.01 is more secure. At that time background noise (cf. Fig.8, lower panel) and artificial signal (cf. Fig.8, upper panel) tell the same story. The strong frequency dependence (positive trend) in the ratio of background noise and in the ratio of the artificial signal suggests that this was an effect of the ionosphere conditions overhead of NUR.

The main message of our study is to be seen in the contrasting behavior of the artificial signal as a function of distance from the source and as a function of ionospheric conditions as a whole. There is evidence for the influence of the ionospheric anisotropy on the propagation path as well as for the effect of the ionospheric conditions overhead of the observation point. The steep frequency dependence in the relevant quantities at NUR during night 27.09.01 in contrast to all the other daytime and nighttime measurements is already enough proof for a definite nontrivial effect.

We have not been very lucky during the campaign in 2001 in the sense that all registrations from the Finnish chain of pulsation magnetometers did not exhibit SRS from the ionospheric Alfvén resonator. It means that during the time of our experiment the ionosphere was not very "talkative" [Belyaev et al., 1989; Belyaev et al., 2000].

Let us compare now theoretical estimates of magnetic field amplitudes at different stations with the experimental results. For the comparison we choose the day of 01.10.01 when a powerful  $E_S$  layer existed which blanked the upper ionosphere (the plasma frequency was close to  $\omega_{0e} \approx 6$  MHz during the night runs of 01.10.01). Thus the upper wall could be modeled by a homogeneous anisotropic halfspace with the  $E_S$  layer characterized by

$$n_{1,2} = \sqrt{\pm g}, \quad g = \omega_{0e}^2 / \omega_{He} \omega$$

where  $\omega_{0e}$  is the plasma frequency of the  $E_S$  layer and  $\omega_{He}$  is the electron gyro frequency.

The refractive indexes  $n_{1,2}$  for normal waves in such conditions are given by the above formulae yielding values of  $|n_{1,2}|$  of the order of  $5 \times 10^3$  for  $f = \omega / 2\pi = 1$  Hz. The value  $k_0 n_{1,2} h \approx 10$  ( $\gg 1$ ), holding for practically all receiving stations, guarantees the validity of the impedance approximation. The calculations by formulae (2)-(3) provide us with the dependencies of magnetic field module being inversely proportional to the squared distance from the source. This agrees well with the experimental results (see Fig.11).

For the effective conductivity of the Earth underneath the antenna a value of  $\sigma = 10^{-3}$  S/m was chosen since it provides the best matching with the experimental results. The value is in fact one order of magnitude higher than what is usually applied to the VLF band (frequencies above 30 Hz). As one can see, the experimental curves for the ratio of linear components versus direction to the ULF source coincide rather well with the theoretical ones, although one must admit that also a distinct asymmetry as well as a dependence on frequency exists (see Fig.12). The theoretical curves were obtained for a frequency of 3Hz.

(defined as the ratio  $p = HR/HL$ ) is sensitive to the ionospheric conditions above the observation point. As stated in the relevant literature [Belyaev et al., 2002] the spectral resonance structure (SRS) is only observed when  $p > 1$ . It signals an influence of the local ionospheric gyrotropy and results in an anisotropic noise parameters at the receiving point. The observed ratio  $p$  above unity for the artificial signal detected at SOD (cf. Fig.7, upper panel) in spite of the value of  $p$  close to unity for the background noise (cf. Fig.7, lower panel) indicates that there was no ionospheric anisotropy above the observation site (367 km from the transmitter) but there was an anisotropy of the Earth crust underneath the ULF wave radiator.

The interpretation of observations at NUR located about 1000 km away from the radiator is more tricky (cf. Fig.8). Except for frequencies below 1 Hz the background magnetic noise during the night of 1.10.01 (and actually also during the night of 2.10.01; both disturbed) was not polarized (ratio  $p$  close to unity; cf. Fig.8, lower panel), still the artificial signal exhibited a frequency dependence (negative trend).

Could this be attributed to a source region

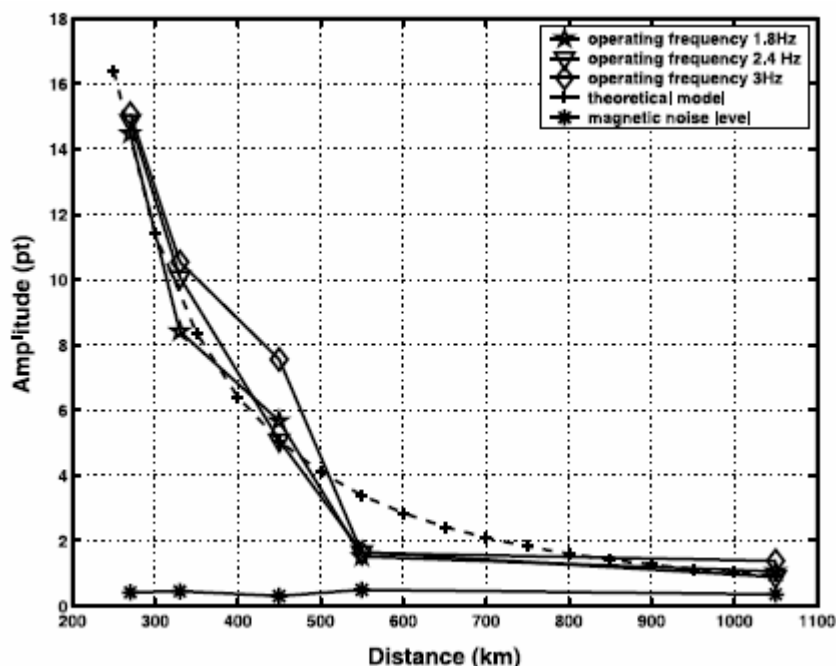


Fig. 11. The dependence of the magnetic-field absolute value on the distance from the transmitter; experiment and theory in comparison.

As regards frequency dependence, we have noticed that at the nearest stations (see, e.g., IVA of Fig.6, upper panel) the linear component practically does not depend on frequency. This behavior did not change from one experimental run to another. The experimental as well as theoretical dependences of the signal magnetic field modules on frequency for the stations IVA and ROV are shown in Figures 13 and 14, respectively. One can notice a great discrepancy between experiment and theory, the latter making the assumption of homogeneity of the Earth's crust underneath the antenna. A more refined model has to be made to fit with the experimental data. Several factors which probably influence the received signal but are neglected in the model are discussed below.

Currents at frequencies below 4 Hz penetrating deep into the Earth's crust meet somewhere at a depth of about 10 km a layer with high conductivity. In consequence the magnetic moment of the ULF source does not grow with decreasing frequency any more. Also, one more item can be noticed in Fig.14, the growth of amplitude with frequency in ROV. Probably, this behavior is explained by anisotropy of the layers beneath the antenna. The observed ellipticity of the magnetic field (about 10 - 30%) could be explained by the same effect (cf. Fig.7, upper panel). The asymmetry of the linear components' ratio versus source direction could in turn be taken as evidence for anisotropy of the Earth's crust under the ULF source. In the calculations it was assumed that the magnetic moment of the source pointed to the north. However, the presence of anisotropy under the antenna (for example, an inclination of the high conducting layer) will lead to a rotation of the direction of the magnetic momentum as a function of frequency (cf. Fig.12).

It is interesting to note that the discussion on the presence of a layer with high conductivity around 10 km in depth on the Kola Peninsula has a long history [see Velichov et al., 1998, and references therein]. The authors of the latter work denied the presence of such a layer. Their conclusions were based on magnetic sounding by a pulsed MHD generator (experiment "Khibiny"). Results of classical magnetotelluric sounding, however, on the profile just crossing our antenna suggested the presence of a thick (about 11 km) layer with a specific resistance of 250 Ohm/m starting at 10.6 km under the first layer with a specific resistance of  $10^5$  Ohm/m [Kovtun et al., 1986].

Currents at frequencies below 4 Hz penetrating deep into the Earth's crust meet somewhere at a depth of about 10 km a layer with high conductivity. In consequence the magnetic moment of the ULF source does not grow with decreasing frequency any more. Also, one more item can be noticed in Fig.14, the growth of amplitude with frequency in ROV. Probably, this behavior is explained by anisotropy of the layers beneath the antenna. The observed ellipticity of the magnetic field (about 10 - 30%) could be explained by the same effect (cf. Fig.7, upper panel). The asymmetry of the linear components' ratio versus source direction could in turn be taken as evidence for anisotropy of the Earth's crust under the ULF source. In the calculations it was assumed that the magnetic moment of the source pointed to the north. However, the presence of anisotropy under the antenna (for example, an inclination of the high conducting layer) will lead to a rotation of the direction of the magnetic momentum as a function of frequency (cf. Fig.12).

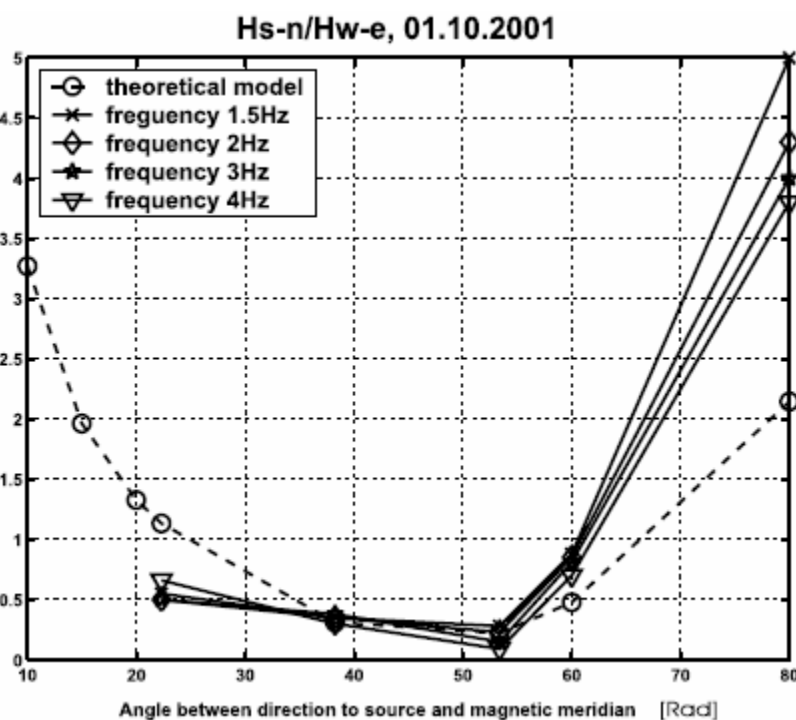


Fig. 12. The dependence of the magnetic field components' ratio on the direction to the ULF source; experiment and theory in comparison.

## 6. Summary

The main results of the campaign in 2001 are as follows:

1. The artificial ULF signals were detected at all six stations of the Finish magnetometer chain (at distances from 200 up to 1000 km) with a signal/noise ratio from 30 to 68 dB. Spatial and angular dependences of signal parameters were reliably measured. A good efficiency of the facility as a source of artificial ULF signals was demonstrated under a variety of different geophysical conditions.

2. A distinct difference was revealed in nighttime frequency dependence of amplitude and polarization of the artificial signals under quiet and disturbed geophysical conditions.

3. The comparison of measured and calculated characteristics of the ULF signals allowed us to obtain information on the non uniform Earth crust structure beneath the antenna, i.e., the presence of a high conductive layer at a depth of 8 to 10 km. The estimated effective conductivity of the half space under the antenna for frequencies below 5 Hz is of the order of  $10^{-3}$  S/m.

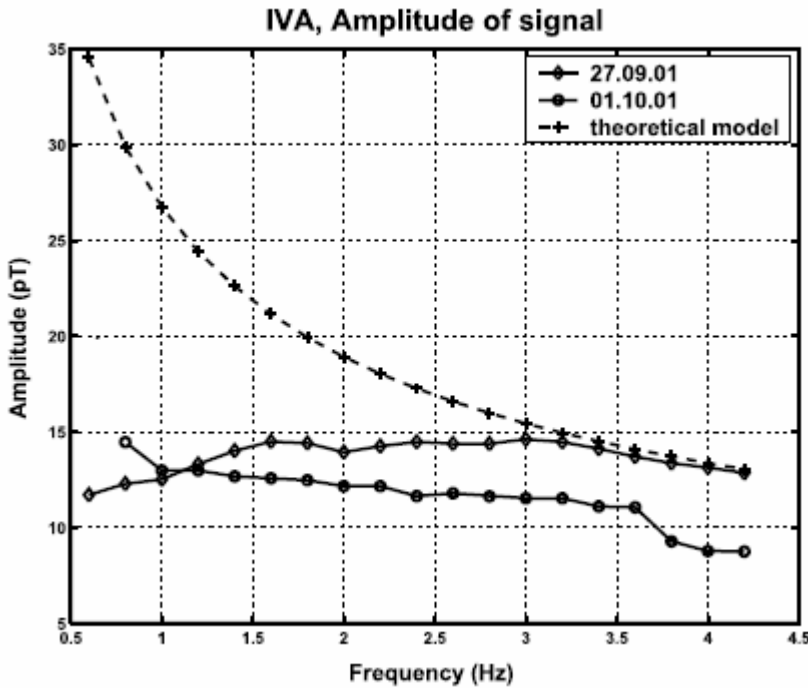


Fig. 13. The dependence of the ULF field signal module on frequency for the station IVA; experiment and theory in comparison.

Two main conclusions can be drawn from the results presented above: the characteristics of the received signals from an artificial, controlled ULF source greatly depend on the Earth's crust structure beneath and underneath the antenna as well as on geophysical and ionospheric conditions. It was shown that the use of the Kola Peninsula ULF facility, at least for distances up to 1000 km, can provide an efficient tool to investigate the Earth's crust structure and some ionospheric properties.

It should be made clear that our simple model of an ULF source placed on the ground describes the properties of the received signal only above 5 Hz. For lower frequencies this model is no more adequate; at the most it can explain the signal strength dependence on distance.

Improvements of the theory should be made including a layered Earth's crust structure and allowance for possible violations of the impedance condition at the ionospheric boundary. In this way a more accurate assessment of the spectral and polarization characteristics would increase the overall value of the ULF power line as a scientific tool.

In connection with the high latitude of the Kola ULF facility, it should be also mentioned that the McIlwain  $L$  value is about  $\sim 5.5$ - $6.5$ . The corresponding proton gyro frequencies at the top of magnetic field lines with these  $L$  values are in the range of 1 to 4 Hz. This is just in the ULF transmitter's operating frequency band. Thus it looks very attractive to carry out experiments aiming at injecting artificial ULF signals into the magnetosphere and thereby triggering interactions with hot protons. It is also attractive to use this facility in experimental campaigns in conjunction with operating and forthcoming satellites, such as DEMETER (cf. <http://demeter.cnrs-orleans.fr>), CLUSTER, or RESONANCE, respectively.

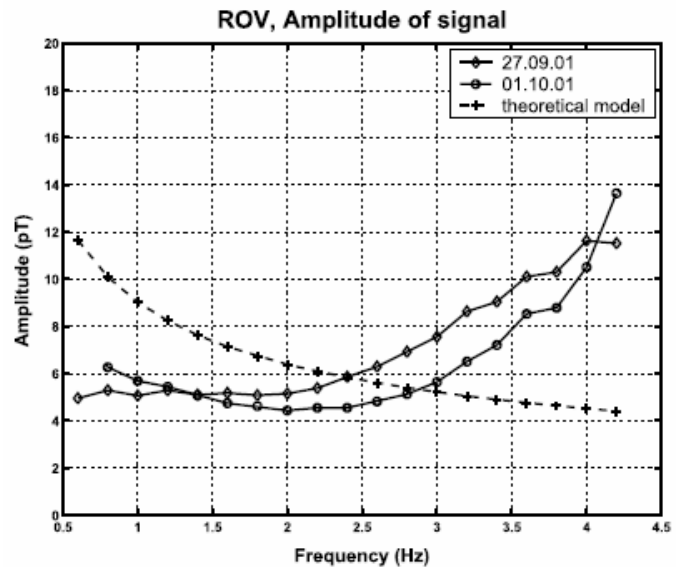


Fig. 14. The dependence of the ULF field signal module on frequency for the station ROV; experiment, and theory in comparison.

### Acknowledgments

The work is done under support of RFBR (project 04-02-17333) and the Ministry of Education (project E02-8.0-33). Data from the Finnish chain of pulsation magnetometers were kindly provided by the Sodankyla Geophysical Observatory.

Shadia Rifai Habbal thanks Andrei G. Demekhov and another referee for their assistance in evaluating this paper.

### References

- Bannister, P. R., F. J. Williams, A. L. Dahlvig, and W. A. Kraimer (1974), Wisconsin Test Facility transmitting antenna pattern and steering measurements, *IEEE Trans. Comm.*, 22(4), 412-418.
- Belyaev, P. P., D. S. Kotik, S. N. Mityakov, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Y. Trakhtengerts (1987), Generation of electromagnetic signals at combination frequencies, *Radiophys. Quantum Electron.*, 30(2), 248-267.
- Belyaev, P. P., et al. (1989), Experimental studies of the spectral resonance structure of the atmospheric electromagnetic noise background within the range of short period geomagnetic pulsation, *Radiophys. Quantum Electron.*, 32, 663-672.
- Belyaev, P. P., L. A. Sobchakov, S. V. Polyakov, N. L. Astakhova, A. V. Vasiljev, and S. I. Isaev (1997), First measurements of artificial ULF signal reception at a distance of 1500 km, in *The 5th European Heating Seminar, Rep. Ser. in Phys. Sci., Rep. 6*, pp. 4-5, Univ. of Oulu, Sodankyla, Finland.
- Belyaev, P. P., S. V. Polyakov, E. N. Ermakova, and S. V. Isaev (2000), Solar cycle variations in the ionospheric Alfvén resonator 1985 -1995, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62(4), 239-248.
- Belyaev, P. P., et al. (2002), First experiments on generation and receiving artificial ULF (0.3 -12) Hz emissions at a distance of 1500 km, *Radiophys. Quantum Electron.*, 46(12), 135-145.
- Blohm, E. K., P. Worzyk, and H. Scriba (1977), Geoelectrical deep soundings in Southern Africa using the Cabora Bassa power line, *J. Geophys.*, 43, 665-679.
- Bosinger, T., T. Pashin, A. Kero, P. Polari, P. Belyaev, M. Rietveld, T. Turunen, and J. Kangas (2000), Generation of artificial magnetic pulsations in the Pc1 frequency range by periodic heating of the Earth's ionosphere: Indications of ionospheric Alfvén resonator effects, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62(4), 277 -297.
- Bosinger, T., A. G. Demekhov, and V. Y. Trakhtengerts (2004), Fine structure in the ionospheric Alfvén resonator spectra observed at low latitude ( $L=1.3$ ), *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18802, doi:10.1029/2004GL020777.
- Cantwell, T., P. Nelson, L. Webb, and A. S. Orange (1965), Deep resistivity measurements in the Pacific Northwest, *J. Geophys. Res.*, 70(8), 1931-1937.
- Hayakawa, M., O. A. Molchanov, A. Y. Schekotov, and E. Fedorov (2004), Observation of ionospheric Alfvén resonance at a middle latitude station, *Adv. Polar Upper Atmos. Res.*, 18, 65-76.
- Kovtun, A. A., et al. (1986), MT and AMT sounding on Kola Peninsula and Karelia, in *The Deep Electroconductivity of Baltic Shield*, edited by L. L. Van'yan, pp. 34-48, USSR Acad. of Sci., Petrozavodsk, Russia.
- Lundholm, R. (1946), The experimental sounding of d.c. through the earth in Sweden, paper presented at Conf. Int. des Grands Reseaux Electriques a Haute Tension, Int. Council on Large Electr. Syst., Paris.
- Parrot, M., and Y. Zaslavski (1996), Physical mechanisms of man-made influences on the magnetosphere, *Surv. Geophys.*, 17(1), 67-100.
- Samson, J. C. (1969), Deep resistivity measurements in the Fraser Valley, British Columbia, *Can. J. Earth Sci.*, 16(5), 1129-1136.
- Sapugak, Y. S., and B. S. Eneenstain (1980), Usage of the power line currents for electromagnetic sounding of the Earth, *Dokl. Akad. Nauk*, 252(4), 838-841.
- Sobchakov, L. A., S. V. Polaykov, and N. L. Astakhova (2003), Excitation of electromagnetic waves in a planar waveguide with anisotropic upper wall, *Radiophys. Quantum Electron.*, 46(12), 918-927.
- Stubbe, P. (1996), Review of ionospheric modification experiments at Tromso, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 58, 349-368.
- Terechenko, E. D., A. E. Sidorenko, V. F. Grigor'ev, A. N. Vasil'ev, L. A. Sobchakov, and A. V. Vasil'ev (2005), The peculiarities of frequency dependence of horizontal components of magnetic field at ultra low and extremely low bands, *Pis'ma v JTF*, 31(14), 30-33.
- Van Zijl, J. S. V. (1969), A deep Slumberger sounding to investigate the electrical structure of the crust and upper mantle in South Africa, *Geophysics*, 34(3), 450-462.
- Velichov, E. P., et al. (1994), Experience with frequency electromagnetic sounding of the Earth's crust by using powerful ELF antenna, *Dokl. Akad. Nauk*, 338(1), 106-109.
- Velichov, E. P., et al. (1998), Deep electromagnetic searching using the powerful ELF radio facilities, *Fiz. Zemli*, 8, 3-22.
- Wait, J. R. (1972), *Electromagnetic Waves in Stratified Media*, 372 pp., Elsevier, New York.
- =====



**Zhamaletdinov A.A.<sup>1,2,3</sup>, Petrishchev M.S.<sup>1</sup>, Shevtsov A.N.<sup>2</sup>, Kolobov V.V.<sup>3</sup>, Selivanov V.N.<sup>3</sup>, Esipko O.A.<sup>4</sup>, Kopytenko E.A.<sup>1,5</sup>, Grigorjev V.F.<sup>6</sup> (2012) Electromagnetic Sounding of the Earth's Crust in the Vicinities of the SG-6 and SG-7 Superdeep Boreholes in the Fields of Natural and Powerful Controlled Sources // Doklady Akademii Nauk, 2012, Vol. 445, No. 2, pp. 205–209.**

<sup>1</sup>Pushkov Institute of Earth's Magnetism, Ionosphere, and Propagation of Radio Waves, St. Petersburg Branch, Russia

<sup>2</sup> Geological Institute, Kola Science Center, RAS, Apatity, Russia, abd.zham@mail.ru

<sup>3</sup> Center for Physical-Technical Problems of the North, Kola Science Center, RAS, Apatity, Russia

<sup>4</sup> OAO NPTs Nedra, Yaroslavl, Russia

<sup>5</sup> OOO VEGA, St. Petersburg, Russia

<sup>6</sup> Polar Geophysical Institute, Kola Science Center, RAS, Apatity, Russia

**Abstract**

The results of electromagnetic sounding of the Earth's crust in the vicinities of the SG-6 and SG-7 superdeep boreholes (Yamal-Nenets Autonomous Okrug) are presented. The studies were conducted in the fields of natural sources (AMT-MTS) and in the field of the "Zeus" ULF antenna located at a distance of more than 2000 km from the receiver points. In the vicinity of the SG-7 superdeep borehole, where the small industrial noise was observed, the results of inverse problem solution are completely consistent with the electric logging data. The conducting layers have been identified at the depths of 150 m and 1.1 km. The roof of rocks having small electrical conductivity and belonging to the Permian-Triassic trappean complex has been found at the depth of about 7 km. The response of the Zeus signal (the frequency range of 44-182 Hz) has indicated the properties of the upper part of the geoelectrical section better than audiomagnetotelluric sounding for both boreholes. Based on the sounding in the vicinity of the SG-6 superdeep borehole, with the data of the Novosibirsk observatory taken into account, the distribution of resistivity down to about 800 km depth has been obtained. This distribution can serve as additional information in calculation of the temperature and rheological regime of the lithosphere and the upper mantle in the region of Western Siberia.

In prospecting for mineral resources, the most promising method, with the exception of seismic survey, is electric survey. Electrical conductivity allows specialists to make decisions about the material composition, temperature, and fluid regime of the underground medium. Electrical conductivity can also carry indirect information about the porosity and structural pattern of current conductive channels at depths, about the presence of particular melting zones, and about the rheological properties of the lithosphere. One of the ways for improving the electric survey validity is increase in determination of the precision of the medium response function. In this sense, controlled-source audio-frequency magnetotelluric (CSAMT) sounding, in combination with audio-magnetotelluric and magnetotelluric sounding (AMT-MTS), is of a certain interest. The main advance of the CSAMT is that the position and configuration of the source are absolutely known and the optimal frequency range can be chosen for sounding. The modern powerful generators [2,3,9] and computerized digital measuring systems [5,6] allow researchers to collect and record a useful signal against the background of intensive industrial noise.

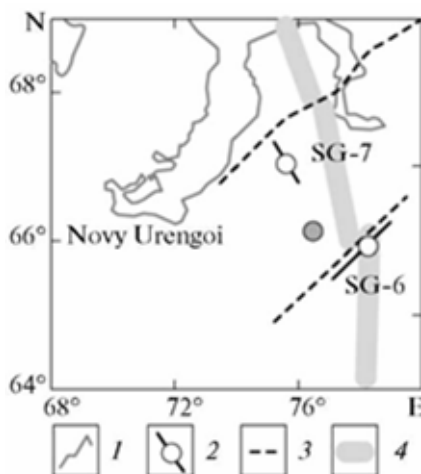


Fig. 1. The scheme of the study area: 1, coastline; 2, boreholes and sounding points with the chosen directions of *E*-polarization; 3, transform faults; 4, axial line of the Ob paleorift [1].

In September 2011, the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences and Pushkov Institute of Earth's Magnetism, Ionosphere, and Propagation of Radio Waves, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Branch, implemented the first stage of elaboration of sounding technique with the use of natural and powerful controlled sources in the Yamal-Nenets Autonomous Okrug. The studies were made in the area of the superdeep boreholes SG-6 (Tyumenskaya) and SG-7 (En-Yakhinskaya). The situation of the boreholes is shown in Fig. 1. The SG-6 borehole (bottom is at the depth of 7502 m) is located 50 km east of the largest natural gas field, Nizhnii Urengoi, in the zone of positive potential fields. This borehole resulted in the most complete section of the Early Jurassic and Permian-Triassic deposits at that time; however, it did not reach the Paleozoic basement. Hence, the oil and gas perspective was not assessed for the basement. Drilling of the SG-6 borehole was stopped in 1994 for technical reasons. The SG-7 borehole was drilled in 2000 at the Bolshoi Urengoi field, at Pestsovyi Swell, 160 km northwest of the SG-6 borehole, in the zone of negative potential fields. At present, it is the deepest borehole drilled in sedimentary basins of Russia (8250 m). At the depth of 6920 m, the borehole entered into the cenotypal alkali effusive rocks of the Permian-Triassic trappean formation, which are analogous to the trap-rocks of the Siberian Craton [10]. In the SG-6 borehole trap-rocks occurred at a smaller depth, 5500 m. Drilling of the SG-7 borehole is still in progress.

In 2011, measurements of signals from the "Zeus" ULF antenna [3] and AMT-MTS works were implemented in the vicinities of SG-6 and

SG-7 boreholes. Recording of both signals was performed with the KVVN-7 digital system applied [6]. Magnetic field was measured by two IMS008 broadband sensors manufactured by OOO Vega ( $H_x, H_y$ ; 0.005-6000 Hz). Records of ULF signals from the “Zevs” source are given in Fig. 2. The “Zevs” source proper is a highvoltage grounded electric line of 55 km long [3]. This electric line is latitudinally oriented (E-W) and is placed in the territory of the Murmansk granite block, Kola Peninsula, at a distance of 2200 km from the study area. Its position relative to the SG-6 and SG-7 boreholes is shown in the inset of Fig. 2. The “Zevs” antenna operated at the frequencies of 188, 144, 82, 62, and 44 Hz. Its signals were confidently recorded in both boreholes. The electric field noise level in the vicinity of the SG-6 borehole was higher than that in the vicinity of the SG-7 borehole; in contrast, the noise intensity in the magnetic components of the field differed insufficiently. Polarization of the measured field of the controlled source in the areas of both boreholes agrees with the latitude orientation of the emitting antenna with up to 5° degrees precision. The full vector of the electric field at all the frequencies was directed in the latitudinal direction, while that of the magnetic field was directed in the meridional direction.

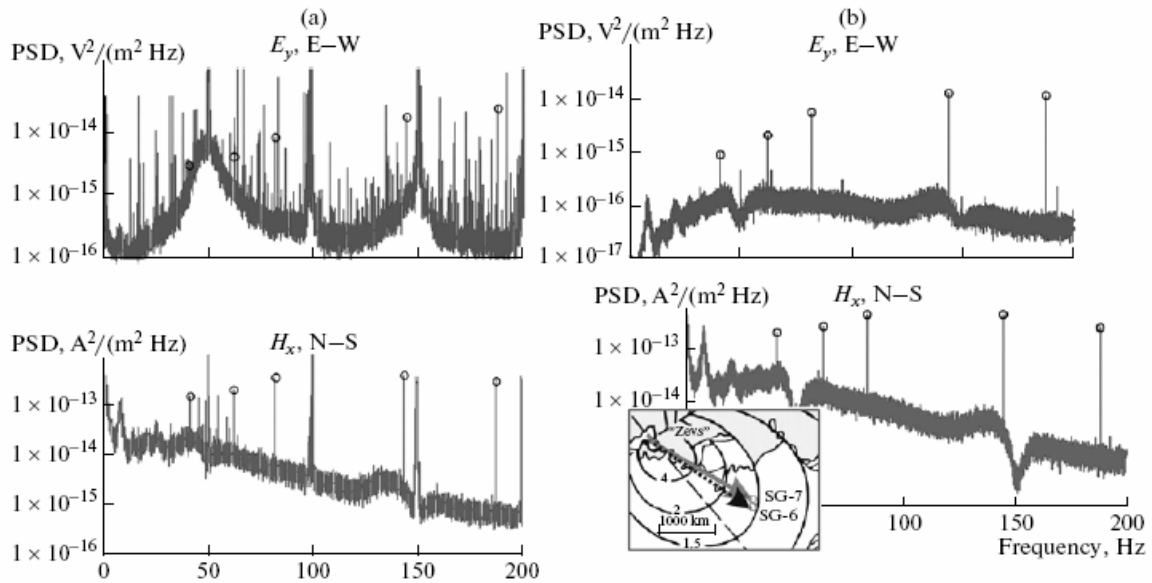


Fig. 2. Diagrams for power spectral density (PSD) of electric ( $E_y$ ) and magnetic ( $H_x$ ) fields based on the “Zevs” antenna ULF signals recorded in the vicinities of the SG-6 and SG-7 boreholes. Source and receiver positions are shown in the inset, bottom left part of the figure.

Despite the long distance between the boreholes (160 km), the signal intensity in the magnetic field component nearly did not change moving farther from the source, and the signal in the electric field component at the SG-6 borehole was higher by 30% than that at the SG-7 borehole. Such behavior of the field of the borehole is explained by the relatively high resistivity of the upper part of the section in the vicinity of the SG-6 borehole. The results of electric logging for both boreholes are given in Fig. 3.

The most valid AMT-MTS results were obtained in the vicinity of the SG-7 borehole where the smallest technogenic noise sounded during the observations (Fig. 2). Processing was made in the PTS program (developed by M. Petrishchev, A. Tkachev and V. Semenov). Processing implied assessment of the relationship between the spectra of electromagnetic field components in terms of the coherence level [7] and the directions for which minor components of the apparent resistivity tensor were either absent or negligibly

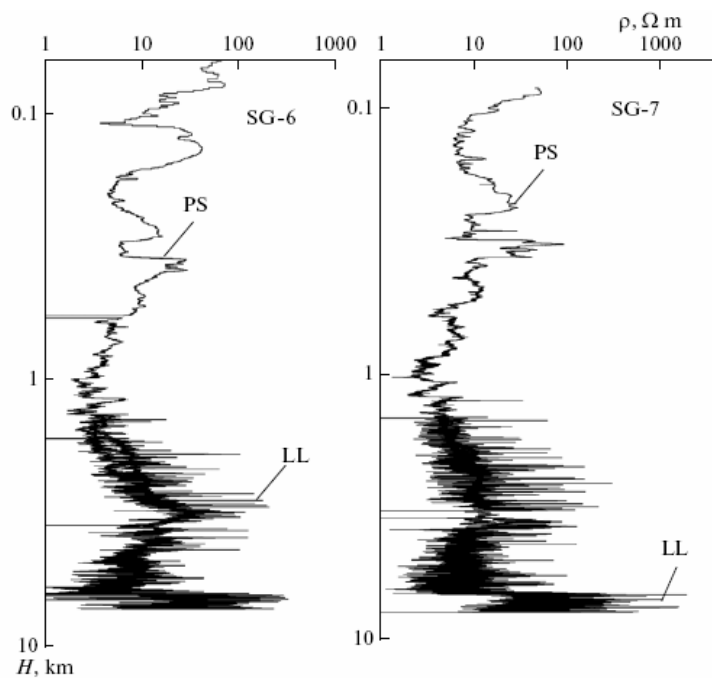


Fig. 3. The results of electric logging in the SG-6 (Tyumenskaya) and SG-7 (En-Yakhinskaya) superdeep boreholes by the methods of potential sonde (PS) and lateral logging (LL).

small were chosen. After the direction was chosen, the sliding was made along the realization for the statistical set of estimates. Sliding was made with the set coherence thresholds that reduced displacement errors in determination of the impedances. Then the median values of estimates were determined in the derived set of values for every period. The advance of such an approach is reduction of the random error value.

The processing and interpretation of results are presented in Fig. 4 (measurements in the vicinity of the SG-7 borehole are exemplified). Interpretation of the AMT-MTS data was made for E-polarization of the field; the polarization angle was  $\sim 30^\circ$  eastwards (Fig. 1). This is the direction in which stable response functions were derived in the range of periods from  $10^{-3}$ - $10^2$  s (Fig. 4, 2), and this direction corresponds to that of the axial line of the Ob paleorift [1]. The MTS results were supplemented, first, with the results of numerical modeling on the sphere, made by Jan Vojar utilizing the software by A. Kuvshinov et al. [12] for the Novosibirsk (NVS) observatory (Fig. 4, 3) in accordance with the technique described in [15], and, second, by the response function of the nearest NVS observatory in the range of periods from  $4 \times 10^5$  to  $10^8$  s [8] (Fig. 4, 4) in the same way as [14]. Note that the method of MTS curves supplemented with magneto-variation response functions substantially improves the stability of the inverse problem solution through determination of the respective inversions; moreover, it often allows the displacement error in long periods of apparent magnetotelluric resistivity to be eliminated. In practice, high effectiveness is proven for the D+ [13] and OCCAM [11] inversions. The former increases the estimates of the apparent resistivity modulus; the latter increases the phase of this modulus. In our opinion, the OCCAM inversion is preferable, since the error in phase estimates is determined largely by random error, in contrast to the modulus estimates, whose error is related to both displacement errors (static shift) and random errors.

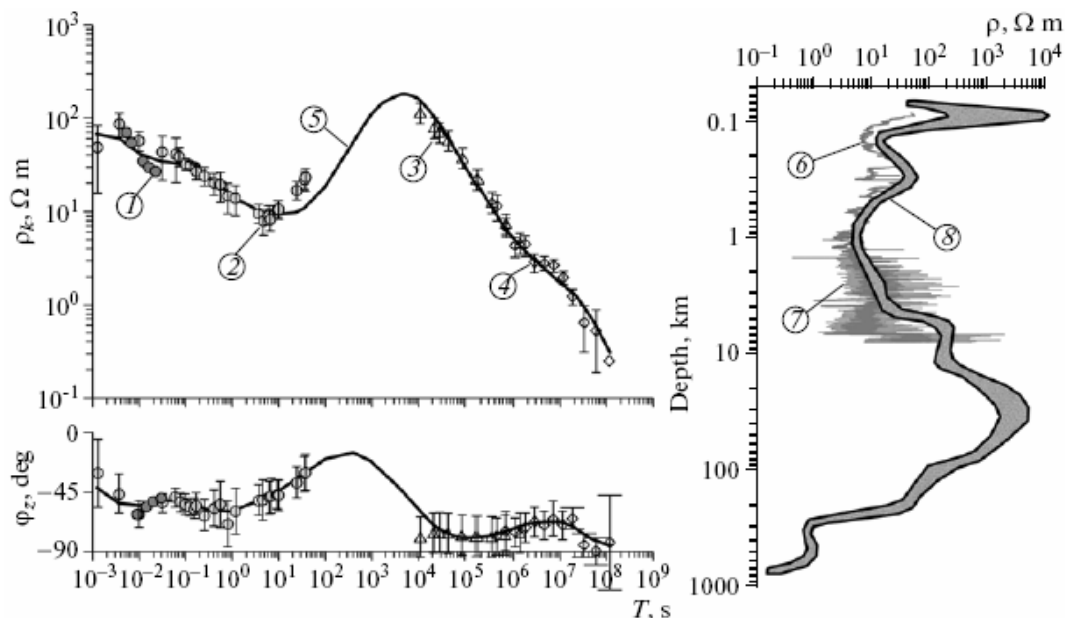


Fig. 4. The summarized diagram showing the curves of apparent resistivity and impedance phase based on the sounding data obtained in the vicinity of the SG-7 superdeep borehole and the result of inverse problem solution in comparison with the borehole logging data: 1, response from the “Zevs” ULF antenna; 2, AMT-MTS data; 3, 4, MVS data, Novosibirsk; 5, model curve from the inverse problem solution; 6, 7, logging results (6, potential sonde, 7, lateral logging); 8, geoelectrical section based on the AMT-MTS-MVS inverse problem solution and sounding with the use of the “Zevs” controlled source.

The signal of the “Zevs” ULF antenna is shown in Fig. 4, 1. As a result of the inversion implemented in the MT1D program (v. 2.0) for the derived sounding curves with various parameters, a model of the geoelectrical section has been obtained (Fig. 4, 8). The results of resistivity lateral and potential-sonde loggings in the SG-7 borehole (Fig. 4, 6 and 7, respectively) and the averaged curve of the geomagnetic section after the implemented inversions (Fig. 4, 5) are given here as well.

As a result of comparison between the sounding results and logging data, two conducting layers have been found in the upper part of the SG-7 borehole (Fig. 4). The logging and sounding data are quite consistent in this sense. The first layer lies in the depth interval of 150-200 m, and its specific resistivity is 10-20 Ohm·m. The second layer has greater thickness (700-1400 m) and higher electrical conductivity (less than 10 Ohm·m). In the depth interval of 5 to 7.5 km, the data of logging and the geoelectrical model show slightly different results; however, they begin to agree well again from the depth of 7.5 km, which corresponds to some of the effusive rocks belonging to the trap complex [10].

We should place emphasis on the comparison of the results for the soundings in the fields of natural and controlled sources (Fig. 4). The overlapping range of periods was, in this case,  $5 \times 10^{-3}$  -  $3 \times 10^{-2}$  s. It is the range in which the roof of the first conducting layer is identified with the center of the layer at the depth of 150 m. The estimates of apparent resistivity based on the results of processing magnetotelluric records appeared to be overestimated, while the

responses from the “Zevs” source, vice versa, are underestimated. The averaged model curve of sounding was drawn between them. The advance of the response from the “Zevs” source is that it was the best indicator of the upper conducting layer.

The results obtained show the advances and broad opportunities of electromagnetic sounding equipped with natural and controlled sources when studying the deep structure of the sedimentary cover in the territory of oil-and-gas bearing fields of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug. The main perspectives in the sense of deep sounding with powerful controlled sources are related to the use of long grounded electric lines in the form of industrial power lines [4].

#### Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 11-05-12033ofi-m-2011) and by the Earth Science Division (grant no. 6).

The authors appreciate valuable advice and notes by V.Yu. Semenov concerning the data processing and interpreting methods; the courtesy of numerical modeling results with respect to response function for the NVS observatory by Jan Vozar; and the useful discussion of magnetic anomaly modeling results made with A.A. Petrova.

Presented by Academician E.P. Velikhov February 10, 2012

Received January 27, 2012

#### References

1. S. V. Aplonov, *Geodynamics of the Deep Sedimentary Basins* (TsGI TETIS, St. Petersburg, 2000) [in Russian].
  2. M. B. Barannik, A. N. Danilin, B. V. Efimov, et al., *Seism. Instrum.* 46, 49—61 (2010).
  3. E. P. Velikhov, A. A. Zhamaletdinov, L. A. Sobchakov, et al., *Dokl. Akad. Nauk* 338, 106—109 (1994).
  4. A. A. Zhamaletdinov, B. V. Efimov, and A. N. Shevtsov, in *Innovative Electromagnetic Methods of Geophysics* (Nauchn. mir, Moscow, 2009), pp. 95—112 [in Russian].
  5. O. I. Ingerov, in *Materials of the 5th All-Russia School EVZ-2011*, St. Petersburg, Russia, 2011 (SPbGU, St. Petersburg, 2011), vol. 1, pp. 86—103 [in Russian].
  6. V. V. Kolobov, D. N. Kuklin, A. N. Shevtsov, and A. A. Zhamaletdinov, *Seism. Instrum.* 48, 75—84 (2012).
  7. V. Yu. Semenov, *Processing of Magnetotelluric Sounding Data* (Nedra, Moscow, 1985) [in Russian].
  8. V. Yu. Semenov and E. P. Kharin, *Izv. Phys. Solid Earth* 33, 720—720 (1997).
  9. E. D. Tereshchenko, V. F. Grigoryev, M. B. Barannik, et al., *Seism. Instrum.* 45, 119—133 (2009).
  10. B. N. Khakhaev, V. I. Gorbachev, V. S. Bochkarev, et al., in *The Basement, Framing Structures of the Western Siberia Mesozoic-Cenozoic Sedimentary Basin, their Geodynamic Evolution and Oil and Gas Presence Problems* (Tyumen, 2008), pp. 224—227 [in Russian].
  11. S. C. Constable, R. L. Parker, and C. G. Constable, *Geophysics* 52, 289—300 (1987).
  12. A. Kuvshinov, H. Utada, D. Avdeev, and T. Koyama, *Geophys. J. Int.* 160, 505-526 (2005).
  13. R. L. Parker, *J. Geophys. Res.* 85, 4421-4428 (1980).
  14. V. Yu. Semenov, A. Adam, W. Jozwiak, et al., *Acta Geophys.* 56, 957-981 (2008).
  15. J. Vozar and V. Y. Semenov, *J. Geophys. Res.* 15, B03101 (2010).
- 
-

### **Глава 3. СНЧ-мониторинг землетрясений и лунно-солнечных приливных явлений.**

**Сараев А.К.<sup>1</sup>, Пертель М.И.<sup>1</sup>, Парфентьев П.А.<sup>1</sup>, Прокофьев В.Е.<sup>1</sup>, Харламов М.М.<sup>1</sup>, Собчаков Л.А.<sup>2</sup>, Васильев А.В.<sup>2</sup>, Песин Л.Б.<sup>3</sup> (1996) Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей СНЧ-радиоустановки для целей прогноза землетрясений на Северном Кавказе. // Тезисы докладов Международной конференции “Закономерности эволюции Земной коры” С.-Петербург, Россия, 1996, т. 1, С. 271.**

<sup>1</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, aks@AS1002.spb.edu

<sup>2</sup>РИМР. Санкт-Петербург, Россия, vasilyev@rimr.ru

<sup>3</sup>Центр ИНЭНКО, Санкт-Петербург, Россия

В декабре 1995 года на Северном Кавказе были выполнены экспериментальные работы по изучению особенностей регистрации и временной стабильности сигналов сверхнизкочастотной (СНЧ) радиоустановки для оценки перспектив использования данного источника при прогнозе землетрясений. В результате проведенных исследований установлено, что наиболее уверенно измерялись сигналы на более высоких, и менее - на низких частотах. Для использовавшейся цифровой компьютеризованной станции аудиоманнитотеллурических зондирований АКФ с эффективной шириной полосы пропускания 0,3 Гц превышения энергетических спектров сигналов электрического  $E$  и магнитного  $H$  поля СНЧ-радиоустановки над уровнем естественных электромагнитных полей составляли 10-11 дБ для частот 125 Гц и 166,6 Гц и 2,5-4дБ для частот 62,5 Гц и 83,3 Гц.

Оценка возможностей использования СНЧ-радиоустановки для мониторинга выполнена на основе сопоставления результатов измерений поверхностного импеданса электромагнитного поля в сеансах 11-12 часов и 15-16 часов. Показано что относительные расхождения импеданса составляют в одной из точек 0,03-2,6%, а в другой - 1,2-2,1%.

Проведено сопоставление результатов измерений напряженности полей СНЧ-радиоустановки и расчетных данных. Показано хорошее совпадение не только измеренных и расчетных величин  $E$  и  $H$ , но и характера их изменения в зависимости от частоты. При этом значения  $E$  в диапазоне частот от 41,6 Гц до 166,6 Гц меняются в основном в пределах  $(3-6) \cdot 10^{-9}$  В/м, а значения  $H$  - в пределах  $(4-8) \cdot 10^{-8}$  А/м.

В целом полученные результаты показывают значительные перспективы использования СНЧ-радиоустановки для мониторинга сейсмоструктурных процессов. Для создания системы мониторинга необходима разработка специализированных аппаратно-программного комплекса и технологий.

---

**Сараев А.К., Пертель М.И. (1996) Перспективы использования низкочастотных электромагнитных полей мощных источников для прогноза землетрясений. // Тезисы докладов Международной конференции “Закономерности эволюции Земной коры” С.-Петербург, Россия, 1996, т. 1, С. 270.**

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, aks@AS1002.spb.edu

В 70-80 годах электромагнитные исследования для целей глубинного прогноза землетрясений проводились с использованием МГД-генераторов и мощных электроимпульсных систем. Благодаря этим работам методы глубинной электроразведки вошли в состав системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений.

Вместе с тем, использование импульсных источников не обеспечивает необходимую точность измерений и однозначность интерпретации результатов. Опыт применения методов электроразведки переменным током показывает, что значительные перспективы для мониторинга сейсмоструктурных процессов и глубинного прогноза землетрясений имеет использование мощных источников гармонически изменяющихся низкочастотных электромагнитных полей.

При использовании таких источников нет принципиальных затруднений в реализации, требуемой для прогноза землетрясений точности измерений в десятые доли - первые единицы процентов. Применение гармонически изменяющихся полей позволяет обеспечить за счет синхронного накопления необходимую помехоустойчивость измерений. Нормальное поле таких источников достаточно полно теоретически изучено, что дает возможность использовать для определения эффективного сопротивления различные характеристики (отдельные составляющие электрического или магнитного поля, импедансы), а также позволяет изучать изменения пространственной ориентировки векторов электрического и магнитного поля в процессе подготовки землетрясения. Для гармонически изменяющихся полей детально разработаны теоретические основы метода

частотных зондирований (как для ближней, так и для дальней зоны), и это обеспечивает достоверную интерпретацию результатов зондирований. Использование сверхнизких (от десятков до сотен герц) и крайне низких частот (от сотых долей до единиц герц) позволяет получать достаточную глубину исследования разреза для исключения влияния мешающих сезонных факторов и изучения интегральных характеристик больших объемов пород с регистрацией изменений удельного сопротивления пород в областях, приближенных к очагам готовящихся землетрясений.

**Saraev A. K., Pertel M. I., Kocherov A. B., Kadyshevich G. M., Nikiforov A. B. (1998)**

**Application of the ELF radio station to seismic activity monitoring // EAGE 60th Conference and Technical Exhibition - Leipzig, Germany, 8-12 June 1998 - Geophysical Division, pp. 115-116. /theses/**

St. Petersburg State University 7/9 Universitetskaya nab., 199034 St. Petersburg, Russia, aks@AS1002.spb.edu

Deep electromagnetic sounding is an important part in a complex of methods, used in earthquakes prediction, as it permits to receive the information about changes of rocks resistivity  $\rho$  at rather large depth, where influence of seasonal factors does not appear, and it is possible to expect more noticeable variations of  $\rho$  because of approach to area of a formed seismic center. Values of apparent resistivity  $\rho_a$  variations during preparation of earthquakes can vary from a few up to 10-20 %, and for their registration it is necessary to supply the high accuracy of measurements (no less than 1-2 %).

An experience of application of alternating current electrical prospecting shows that for getting high accuracy of measurements in a wide frequency range it is perspective to use harmonically varying fields of controlled sources. Instruments, software tools and techniques for application of a powerful extremely low frequency (ELF) radio station to the seismic activity monitoring are developed in the Earth Crust Institute of St. Petersburg University. Located on the Kola Peninsula the ELF radio station consists of a harmonically varying current generator and an antenna system, which is an electro transfer line of about 60 km length oriented in latitudinal direction and grounded at the ends. The value of the current in the antenna is as much as 300 A. Operational frequencies range is from 30 up to 200 Hz.

The ELF-station is a rather powerful source and its electromagnetic field can be measured over extensive territories on the distance up to 10000 km. It allows to supply a prognostic test sites in many regions with the receiving instrumentation of the same type and to make measurements and processing of data on the unified methodical basis with the unified form of results representation.

To evaluate a feasibility of the use of the ELF-station in the seismic activity monitoring the experiments were made on the Northern Caucasus. As a result of the research a capability of signals registration using the ACF-2 device with a frequency resolution of 0.1 Hz at a large distance from the source (2700 km) in a direction, which was close to the minimum of the antenna system directional diagram was shown (fig. 1). The values of electrical and magnetic fields strengths varied thus in limits of  $(2.5-4.5) \cdot 10^{-9}$  V/m and  $(4-7) \cdot 10^{-8}$  A/m accordingly. The evaluation of a possibility to use the ELF-station in the seismic activity monitoring was made by comparisons of electromagnetic field impedance measurements at various moments during the day between each other. It was shown, that relative variations of the impedance at the frequencies of 125.0 Hz and 166.6 Hz were less than 2-3 %.

Variations of separate electrical and magnetic field strength were more significant and were as much as 30-40 %. Measurements of the natural electromagnetic field impedance have shown, that its variations were more valuable (6-8 %) and a dependence of a measurements accuracy on time of day due to change of the natural electromagnetic field level was noticed (fig. 2). Coherences of E and H fields for the ELF-station signals are equal ones for the morning and evening measurements, and for natural fields measurements these

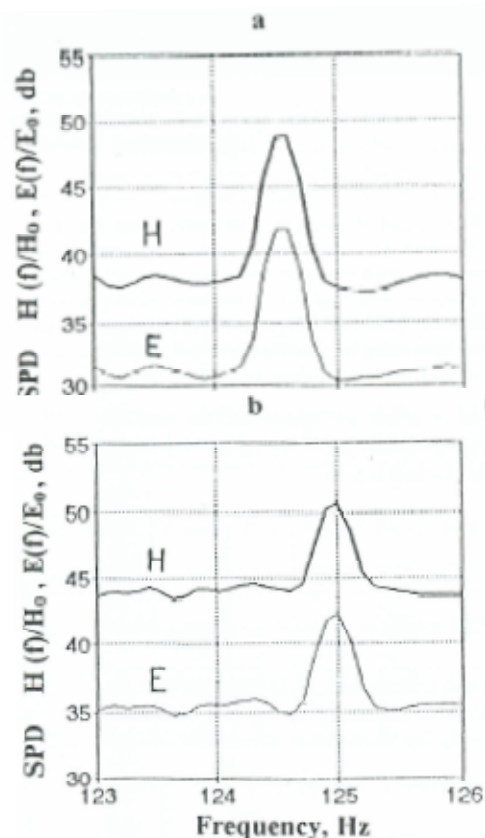


Fig.1. Examples of registration of the ELF radio station signals in the Northern Caucasus at frequencies 166.6 Hz (a) and 125.0 Hz (b) (E,H - spectral power density of electrical and magnetic fields)

coefficients are more different. The  $\rho_a$  curve for the morning measurements is more changeable as the natural field's level in this period of the day is lower.

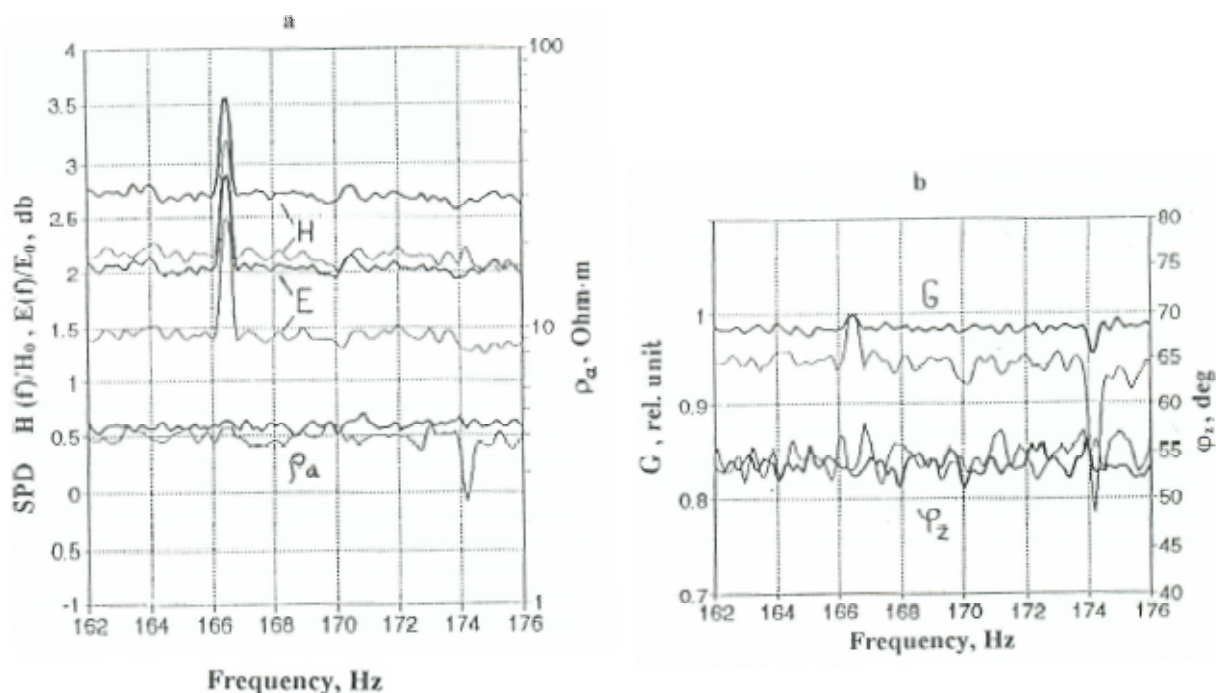


Fig.2. Comparison of the results of natural electromagnetic field measurements in the frequency range 162-176 Hz, signals of ELF radio station at the frequency 166.6 Hz (a), and curves of apparent resistivity  $\rho_a$ , coherence  $G$  and impedance phase  $\varphi_z$  at morning (thin line) and evening (thick line) measurements (a,b)

An experimental research of the ELF-station electromagnetic field was carried out in the Karelian Isthmus at the distance of 950 km from the source. Measurements of signals using an ACF-2.2 device with a frequency resolution of 0.007 Hz at the frequency of 80 Hz round the clock in each 20 min were being made. By results of the experiment a diurnal change of the impedance within the limits of 4-6 %, probably due to tide phenomena, was detected. The impedance measurements accuracy was +1.4 % in the experiment and values of electrical and magnetic fields strengths were as much as  $(4-5) \cdot 10^{-7}$  V/m and  $(2-3) \cdot 10^{-7}$  A/m accordingly.

The work was performed with the support of «Integration» grant, № 326.66.

**Сараев А.К., Пертель М.И., Малкин З.М. (1998) Проявление деформаций земной коры, вызванных приливами, в изменениях импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Вопросы геофизики. Вып. 35. СПб.: Изд-во С - Петербургского ун-та, 1998. С. 136-147. - (Ученые записки СПбГУ; № 433)**

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, aks@AS1002.spb.edu

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  горных пород характеризуется весьма высокой чувствительностью к изменениям напряженного состояния геологической среды. Это связано с определяющим влиянием на данный параметр структурных особенностей горной породы, степени ее влагонасыщенности и минерализации воды. Под воздействием внешнего давления среда деформируется, меняется характер порового пространства и трещиноватости, происходит движение флюидов и, как следствие, изменяется удельное сопротивление породы.

По данным измерений на образцах шлаковых туфов одного из районов Японии, выполненных в 60-х годах, установлено, что для линейной деформации образца  $\Delta L/L = 10^{-6}$  относительное изменение удельного электрического сопротивления  $\Delta\rho/\rho$  составляет около  $3 \cdot 10^{-4}$  и их отношение (коэффициент тензочувствительности) достигает значений  $(\Delta\rho/\rho)/(\Delta L/L) = 300$ . В аналогичных более поздних экспериментах на образцах были получены значения коэффициентов тензочувствительности до  $10^5$ . При проведении лабораторных исследований отмечена существенная зависимость коэффициента

тензочувствительности от неоднородного или слоистого строения горной породы. Величина вариаций  $\Delta\rho/\rho$  на локальном участке изучаемого образца может превосходить на порядок интегральное значение этого параметра для образца в целом [1].

Высокая чувствительность  $\rho$  горных пород к изменению давления широко используется для изучения электроразведочными методами напряженного состояния массивов в подземных горных выработках и прогнозирования горных ударов [2]. Установлено, что кажущееся удельное электрическое сопротивление  $\rho_k$  может меняться в условиях горных выработок более чем в десять раз. Перед горными ударами значения  $\rho_k$  обычно уменьшаются, однако наблюдался и рост  $\rho_k$ . Отмечены также более сложные зависимости аномального изменения кажущегося удельного сопротивления.

На изучении вариаций величин  $\rho_k$ , предшествующих землетрясениям, основано применение различных методов электрических и электромагнитных зондирований для решения прогностических задач. При этом предпочтение отдается глубинным модификациям зондирований, позволяющим получать информацию об изменениях удельного сопротивления горных пород в областях, где в меньшей степени проявляется влияние мешающих сезонных факторов, а также можно ожидать более заметных вариаций величин  $\rho$  за счет приближения к области формирующегося очага землетрясения. Результаты исследований методами глубинной электроразведки [3] показывают, что изменения кажущегося сопротивления  $\rho_k$  обычно наблюдаются в период времени от нескольких месяцев до нескольких дней перед землетрясением, и применение этих методов ориентировано на средне- и краткосрочный прогноз землетрясений.

Величины вариаций  $\rho_k$  в периоды подготовки землетрясений, установленные по результатам глубинных зондирований, составляют от нескольких до 10-20 % [4]. Поэтому для регистрации относительно небольших изменений величин  $\rho_k$  при мониторинге сейсмической активности следует обеспечить высокую точность измерений (десятичные доли процента).

Для мониторинга сейсмической активности необходимо выполнять режимные наблюдения при одном или нескольких разностях установок, на одной или нескольких рабочих частотах, сочетая их с зондированиями на постоянном токе или с использованием переменных полей. По сравнению с электрическими зондированиями на постоянном токе более перспективно применение частотных электромагнитных зондирований. В этом случае остаются неизменными разности установки и условия в районе приемных электродов.

Опыт применения методов электроразведки переменными полями показывает, что высокую точность измерений в широком диапазоне частот можно обеспечить при использовании гармонически изменяющихся электромагнитных полей искусственных источников. Значительные перспективы для мониторинга сейсмической активности в этой связи имеет применение СНЧ-радиоустановки "Зевс".

СНЧ-радиоустановка расположена на Кольском п-ове. Она состоит из генератора гармонически изменяющегося тока и горизонтально расположенной, ориентированной в широтном направлении и заземленной на концах антенны длиной около 60 км. Величина тока в антенне достигает 300 А. Радиоустановка может излучать сигналы сверхнизких частот в диапазоне от десятков до сотен герц. Дальнейшее действие составляет около 10000 км.

Преимуществом использования СНЧ-радиоустановки при мониторинге сейсмической активности по сравнению с другими методами электромагнитных зондирований (с помощью МГД-генератора, с использованием естественных полей) является стационарность поля данного источника. При этом для получения необходимой точности и помехоустойчивости измерений можно использовать требуемую длительность накопления. Для гармонически изменяющихся полей детально разработаны теоретические основы метода частотных зондирований, и это позволяет выполнять достоверную интерпретацию получаемых результатов.

СНЧ-радиоустановка является мощным источником, и составляющие ее электромагнитного поля могут быть измерены на весьма обширных территориях во всех сейсмоопасных районах России, а также сопредельных стран. Это позволяет обеспечить прогностические полигоны однотипной приемной аппаратурой и выполнять измерения и обработку результатов на единой методической основе.

Результаты измерений электромагнитных полей СНЧ-радиоустановки при прогнозировании землетрясений представляются в виде кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  или модуля и фазы поверхностного импеданса равного отношению горизонтальных и ортогональных между собою составляющих электрического и магнитного полей. Значения модуля импеданса связаны с кажущимся удельным сопротивлением по формуле для плоской вертикально падающей волны  $\rho_k = |Z|^2 / (\mu_0 \omega)$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная проницаемость вакуума,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота,  $f$  — частота, Гц. Возможность использования приближения плоской волны и приведенной формулы для определения  $\rho_k$  устанавливается для конкретного района работ по результатам теоретических расчетов [5].

Для оценки перспектив применения СНЧ-радиоустановки при прогнозировании землетрясений нами были измерены составляющие электромагнитного поля этого источника и полученные данные сопоставлены с деформациями земной коры, вызванными приливными явлениями. Эти экспериментальные исследования были нацелены в первую очередь на изучение факторов, определяющих точность измерений полей СНЧ-



радиоустановки. Как показал анализ результатов предшествующих работ по применению электроразведочных методов при прогнозировании землетрясений, наблюдается зависимость кажущегося удельного сопротивления горных пород от напряженного состояния среды, изменяющегося под действием приливных явлений. При проведении дальнейших работ в сейсмоопасных районах ДЛЯ выявления предвестников землетрясений приливные явления следует рассматривать как мешающий фактор, учет которого необходим при мониторинге сейсмической активности.

### **Изучение приливных явлений в связи с задачами прогноза землетрясений**

Взаимосвязи результатов измерений кажущегося удельного сопротивления и деформаций среды, вызванных приливными явлениями, изучались ранее в Японии при помощи установки небольшого размера с расстоянием между электродами 1,6 м. Использование вариометра кажущегося удельного сопротивления и компенсационного способа позволило реализовать высокую точность измерений (относительная погрешность составляла  $10^{-3}$ ). Была установлена взаимосвязь аномалий  $\rho_k$  и деформаций среды, вызванных приливными явлениями. При этом результаты наблюдений сопоставлялись с записями деформографа. Было отмечено, что вызванные приливами деформации величиной  $10^{-6}$  коррелируют с относительными изменениями  $\rho_k$  порядка  $10^{-6}$  [6].

Суточные вариации кажущегося удельного сопротивления, связанные с приливными явлениями, были зарегистрированы в Гармском сейсмоактивном районе Таджикистана при проведении работ с дипольной установкой на постоянном токе с разносами 7-8 км [7]. Амплитуда этих вариаций  $\rho_k$  в течение суток изменялась от 4 до 10 %. Их периодичность совпадала с данными о горизонтальных деформациях земной коры, полученных инструментальными измерениями на станции, расположенной на расстоянии около 250 км от участка работ. Экстремумы на кривой  $\rho_k$  наблюдались примерно на 3-4 ч позже, чем на кривой деформаций. Авторы объясняли вариации кажущегося удельного сопротивления изменением давления на глубине и, соответственно, пористости горных пород вследствие действия приливных сил. Они также не исключали определенного влияния такого фактора, как колебания уровня грунтовых вод. Запаздывание экстремумов на кривой  $\rho_k$  по сравнению с кривой деформаций объяснялось авторами неоднородным строением земной коры вблизи точек наблюдения.

Аналогичные результаты были получены на Ашхабадском прогностическом полигоне методом зондирования становлением поля [8]. Расстояние от питающего диполя до приемных- станций на этом полигоне составляло 5-13 км. При измерениях выявлены суточные вариации  $\rho_k$  с амплитудой 4,5-5,3 %. Данные о приливных деформациях получены с помощью наклономеров. Сопоставление кривых  $\rho_k$  и наклона дневной поверхности  $\Delta\varphi$  показало их достаточно хорошую корреляцию. Изменения  $\rho_k$  связываются авторами [8] с процессами раскрытия и закрытия трещин в горных породах разломных зон и соответствующими изменениями внутрипорового давления и числа проводящих каналов.

Зависимость результатов различных методов электроразведки от приливных явлений используется в настоящее время специалистами Центра "Геон" (Л. Н. Солодилов, Ю. Ф. Коновалов) при оценке перспектив применения этих методов для решения прогностических задач. Одним из критериев применимости метода для мониторинга сейсмической активности считается возможность регистрации периодических изменений кажущегося удельного сопротивления под воздействием приливных сил.

Приливные деформации Земли возникают под действием притяжения Луны и Солнца и сложным образом зависят как от статического действия приливных сил, так и от динамических эффектов, возникающих из-за действия ряда факторов (упругие характеристики земли, приливы в морях и океанах, явления резонанса и др.) [9]. Наибольший приливной эффект на Землю оказывает Луна, а приливное действие Солнца примерно в два раза меньше. Приливные силы действуют как на поверхности, так и внутри Земли, постепенно уменьшаясь до нуля в ее центре.

### **Расчеты деформаций земной поверхности в точке измерений**

При проведении экспериментальных работ точка измерений была выбрана на Карельском перешейке. Полигон Вуокса, на котором выполнялись работы, расположен на расстоянии 950 км от СНЧ-радиоустановки (рис. 1). Этот полигон создан на Вуоксинском массиве гранодиоритов среднего протерозоя. Массив расположен среди метаморфизованных пород (гнейсы, кристаллические сланцы) ниже- и средне-протерозойского возраста. Район характеризуется благоприятными условиями для изучения электромагнитных полей СНЧ-радиоустановки и естественных электромагнитных полей, так как он удален от высоковольтных ЛЭП и местных линий электропередач и характеризуется низким уровнем промышленных помех.

Расчеты деформаций земной поверхности в районе полигона Вуокса, вызванных приливными явлениями, для сопоставления с результатами измерений импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки были выполнены в Институте прикладной астрономии РАН. Расчет производился по наиболее современному алгоритму [10], принятому в настоящее время в качестве стандарта Международного астрономического союза.

Анализ результатов расчетов и данных многочисленных инструментальных наблюдений показывает, что в спектре приливных деформаций преобладают полусуточные и суточные периоды. Максимальное горизонтальное смещение, обусловленное приливом твердой Земли, мало зависит от широты и в среднем

составляет около 10 см. Максимальное вертикальное смещение меняется примерно от 60 см на экваторе до 12 см на полюсе по закону, близкому к косинусному.

На рис. 2 приведены графики изменения деформаций земной поверхности по вертикали ( $dH$ ), меридиональному ( $dN$ ) и широтному ( $dE$ ) направлениям в течение двух суток: 26 и 27 июня 1996 г. Вертикальная и меридиональная приливные деформации содержат постоянные составляющие (выражены в метрах)

$$\Delta H = -0,0598(3\sin^2\varphi - 1), \quad \Delta N = -0,0247 \sin^2\varphi,$$

где  $\varphi$  — широта. Эти составляющие приводят к некоторому сдвигу кривых  $dH$  и  $dN$ , не меняя интересующих нас полусуточных и суточных деформаций.

Наиболее заметные амплитуды деформаций до 20 см характерны для составляющей  $dH$ . Максимальное поднятие земной поверхности отмечается 26 июня в 6:45 всемирного

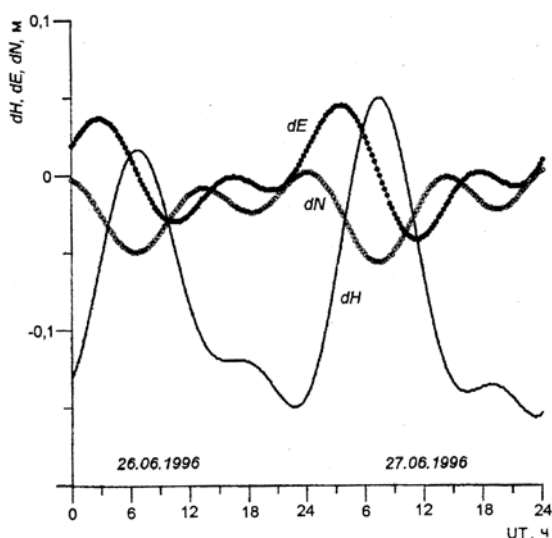


Рис. 2. Графики изменения деформаций земной поверхности по вертикали ( $dH$ ), меридиональному ( $dN$ ) и широтному ( $dE$ ) направлениям.



Рис. 1. Схема расположения СНЧ-радиоустановки и полигона Вуокса. 1 - СНЧ-радиоустановка.

времени (соответствует 10:45 местного времени) и 27 июня в 7:30. Максимальное опускание земной поверхности наблюдалось 26 июня в 22:45 и 27 июня в 23:15.

Другие составляющие смещения земной поверхности выражены в меньшей степени ( $dE$  в пределах 9 см, а  $dN$  — 6 см). Следует отметить, что экстремальные значения для различных составляющих деформации проявляются не одновременно. Для составляющей  $dE$  максимальное значение наблюдается примерно через 4 ч, а для составляющей  $dN$  — через 7,5 ч после максимума на кривой  $dH$ .

### Описание приемной аппаратуры

При проведении измерений нами применялись двух- и четырехканальные модификации созданной в НИИ земной коры СПбГУ аппаратуры корреляционных функций (АКФ), предназначенной для работ методом аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ). С помощью аппаратуры АКФ измеряются сигналы горизонтальных составляющих электрического поля с использованием заземляемых электрических приемных линий длиной обычно от 20 до 100 м и горизонтальных составляющих магнитного поля с использованием индукционных магнитных антенн.

Аналоговая часть аппаратуры АКФ представлена усилителями, имеющими ступенчатое переключение аттенюации и возможность подавления примышленных частот режекторными фильтрами, что обеспечивает линейное преобразование входных сигналов с амплитудой от 1 мкВ до 0,3 В. В цифровой части аппаратуры производится накопление автокорреляционных функций  $K_{EE}(\tau)$  и  $K_{HH}(\tau)$ , связанных с горизонтальными составляющими электрического и магнитного полей, а также взаимной корреляционной функции  $K_{EH}(\tau)$ .

С помощью Фурье-преобразования через корреляционные функции находятся энергетические спектры  $S_{EE}(f)$  и  $S_{HH}(f)$ , по которым определяются значения модуля поверхностного импеданса  $|Z_{XY}|$  и кажущегося сопротивления  $\rho_k$ . Фаза импеданса  $\varphi_z$  вычисляется по реальной и мнимой частям взаимной спектральной плотности сигналов  $S_{EH}(f)$ . Для оценки доли некогерентной части в изучаемых сигналах вычисляются значения коэффициента когерентности  $G_{EH}$ . Величина коэффициента когерентности позволяет оценивать достоверность получаемых результатов.

В рассматриваемых экспериментальных работах использовалась четырехканальная аппаратура АКФ-4 и двухканальная аппаратура АКФ-2.2. Станция АКФ-4 выпускается в настоящее время ГНПП "Геологоразведка". Диапазон ее рабочих частот 1... 3200 Гц, ширина частотных поддиапазонов 200 Гц, разрешение по частоте составляет 0,78 Гц.

Для измерений сигналов СНЧ-радиоустановки разработан прибор АКФ-2.2, в котором в частотных поддиапазонах 2 Гц реализовано разрешение по частоте 0,007 Гц. Диапазон рабочих частот аппаратуры - 1... 260 Гц. Наряду с регистрацией корреляционных функций в аппаратуре реализована прямая запись сигналов. Узкополосный режим измерений позволил увеличить соотношение сигнал/шум и повысить точность измерений сигналов источника гармонически изменяющегося поля. На рис. 3 сопоставляются спектральные плотности мощности (СПМ) сигналов, пропорциональные горизонтальным составляющим магнитного поля СНЧ-радиоустановки, зарегистрированных в широкополосном и узкополосном режимах. Как видно из рисунка, в широкополосном режиме спектральная плотность мощности сигнала СНЧ-радиоустановки превышает уровень естественного магнитного поля в три раза, тогда как в узкополосном режиме это превышение составляет более двух порядков.

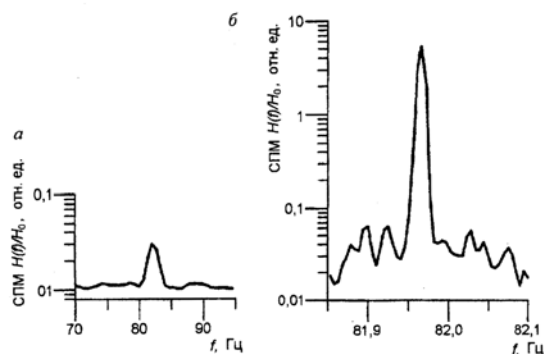


Рис. 3. Сравнение сигнала СНЧ-радиоустановки, зарегистрированного в широкополосном (а) и узкополосном (б) режимах.

#### Анализ экспериментальных результатов

Для оценки геоэлектрического разреза на участке проведения экспериментальных работ были выполнены наблюдения методом АМТЗ с аппаратурой АКФ-4. По результатам обработки данных измерений получены максимальная и минимальная амплитудные ( $\rho_k(2), \rho_k(1)$ ) и фазовые ( $\varphi_z(2), \varphi_z(1)$ ) кривые (рис. 4). Значения  $\rho_k$  на этих кривых различаются примерно в два раза, что свидетельствует о некоторой неоднородности геоэлектрического разреза в горизонтальном направлении. Интерпретация эффективных кривых  $\rho_k$  и  $\varphi_z$  приводит к геоэлектрическому разрезу, характеризующемуся следующими значениями удельного сопротивления и глубин подошвы пластов:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 170 \text{ Ом}\cdot\text{м}, & H_1 &= 58 \text{ м}, \\ \rho_2 &= 2220 \text{ Ом}\cdot\text{м}, & H_2 &= 1660 \text{ м}, \\ \rho_3 &= 8000 \text{ Ом}\cdot\text{м}, & H_3 &= 9100 \text{ м}. \end{aligned}$$

Измерения составляющих электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки в рассматриваемом эксперименте проводились при помощи аппаратуры АКФ-2.2 с использованием узкополосного режима ее работы. Перед проведением экспериментальных работ были выполнены круговые измерения, по результатам которых выбирались направления максимальных сигналов электрического и магнитного поля. Эти направления соответствовали азимутам для электрической приемной линии  $120^\circ$  и магнитной антенны  $30^\circ$ .

Кривая  $\rho_k$  метода сверхнизкочастотного зондирования (СНЧЗ) с использованием сигналов СНЧ-радиоустановки получена на частотах 41,6-166,6 Гц (рис. 4). Эта кривая располагается между минимальной и максимальной кривыми  $\rho_k$  метода АМТЗ и ближе к минимальной кривой. Такое

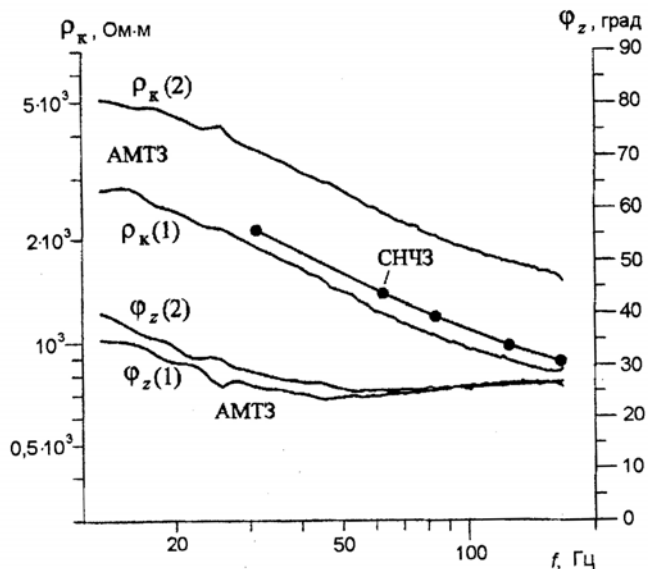


Рис. 4. Кривые  $\rho_k$  и  $\varphi_z$ , полученные методом аудиоманнителлурического зондирования (АМТЗ), и кривая  $\rho_k$ , полученная методом сверхнизкочастотного зондирования (СНЧЗ).

расположение кривой  $\rho_k$  метода СНЧЗ, полученной при ориентировке приемной линии электрического поля длиной 60 м по азимуту  $120^\circ$ , согласуется с северо-западным простираем геологических структур в этом районе. Следует заметить, что комплексирование АМТ и СНЧ зондирований представляется весьма перспективным направлением развития методов глубинной электроразведки, способствующим повышению информативности геоэлектрических исследований и достоверности интерпретации получаемых данных [11].

Для оценки возможностей регистрации эффектов, вызванных приливными явлениями, были проведены измерения сигналов СНЧ-радиоустановки на частоте 80 Гц в течение суток, начиная с 5:00 по всемирному времени 26 июня до 5:00 27 июня 1996 г.; с 15:00 до 20:00 измерения не проводились. Приемная линия электрического поля длиной 60 м была ориентирована по азимуту 120°, а магнитная антенна - по азимуту 30°. Измерения проводились через каждые 20 мин при включении СНЧ-радиоустановки на период времени 7 мин.

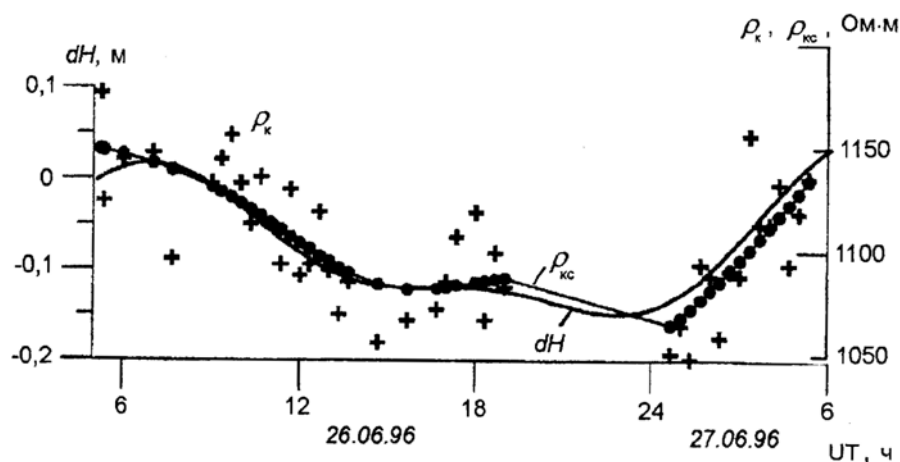


Рис. 5. Сопоставление кривых изменения кажущихся удельных электрических сопротивлений  $\rho_k$ , их smoothed значения  $\rho_{kc}$  и вертикальных деформаций земной поверхности  $dH$ .

На рис. 5 представлены результаты измерений кажущегося удельного сопротивления  $\rho_k$  в сопоставлении с кривой вертикальных деформаций земной поверхности  $dH$ . Как видно из рисунка, кривая  $\rho_k$  имеет достаточно высокую степень корреляции с кривой  $dH$ . Коэффициент корреляции между значениями  $\rho_k$  и  $dH$  равен 0,73.

Более высокое значение коэффициента корреляции 0,95 установлено между smoothed значениями  $\rho_{kc}$  и  $dH$ . При этом, как

видно из рис. 5, наблюдается совпадение кривых  $\rho_{kc}$  и  $dH$  в левой части графика и некоторое их расхождение в правой части в интервале от 0 до 5 ч 27 июня. Это расхождение, по-видимому, связано с временной нестабильностью работы аппаратуры, которая составляет за период времени 10-12 ч около 0,1 %.

Погрешность определения  $\rho_k$  по данным измерений импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки оценивается на основе среднего квадратического отклонения отдельных точек  $\rho_k$  от кривой  $\rho$ . Это отклонение в данном эксперименте составило  $\pm 0,6$  %.

С использованием полученных данных был также выполнен анализ зависимости величин изменений  $\rho_k$  от амплитуд переменной составляющей  $dH$  (рис. 6). Уравнение линейной корреляционной связи в данном случае может быть записано в виде  $\rho_k = 1097 + 240dH$ , где  $dH$  выражено в метрах, а  $\rho_k$  - в омметрах.

Изменения величин  $\rho_k$  в течение суток, установленное по результатам экспериментальных работ, составляют 7 %. Эти значения достаточно близки к величинам вариаций, полученным в упомянутых ранее исследованиях на Гармском [7] и Ашхабадском [8] полигонах.

Рассматриваемые результаты экспериментальных работ и данные предшествующих исследований свидетельствуют о заметных величинах вариаций  $\rho_k$ , обусловленных приливными явлениями. Эти вариации такие же по величине, как и ожидаемые изменения  $\rho_k$  перед землетрясениями. Как отмечалось выше, амплитуда максимального вертикального приливного смещения возрастает от полюса к экватору Земли. Поэтому в южных широтах следует ожидать увеличения вариаций  $\rho_k$ , связанных с приливными явлениями, и учет этих явлений необходим не только при высокоточных измерениях для мониторинга сейсмической активности, но и при проведении работ методами магнитотеллурических, аудиоманнитотеллурических и других электрических и электромагнитных зондирований.

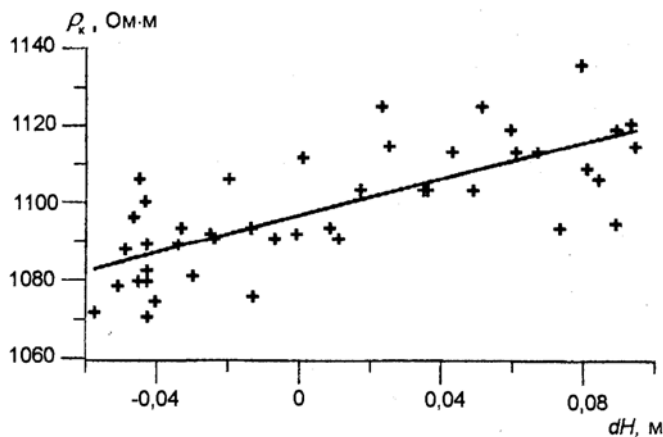


Рис. 6. Корреляционная зависимость кажущегося удельного электрического сопротивления  $\rho_k$  и амплитуд вертикальной деформации  $dH$ .

При мониторинге сейсмической активности по наблюдениям вариаций  $\rho_k$  для повышения достоверности прогноза землетрясений необходимо учитывать влияние приливных явлений и проводить соответствующую коррекцию получаемых данных. Характерным признаком влияния приливов на изменения  $\rho_k$ , не связанных с процессами изменения напряженного состояния среды перед землетрясениями, является периодичность этих явлений. Величины изменений могут быть достаточно точно рассчитаны по данным вычислений деформаций земной поверхности с использованием уравнения корреляционной связи между  $\rho_k$  и  $dH$ , аналогичного полученному для точки проведения экспериментальных работ на Карельском перешейке.

Сопоставление кривых  $\rho_k$  и  $dH$  (рис. 5, 6) показывает, что повышение кажущегося удельного сопротивления соответствует поднятию земной поверхности, а понижение  $\rho_k$  - ее опусканию. Такой характер изменения  $\rho_k$  можно объяснить так называемым "эффектом губки" [12]. Во время прилива земная поверхность поднимается и происходит расширение среды, во время отлива, наоборот, земная поверхность опускается и происходит сжатие. Подземные воды, как в открытых полостях (скважинах, колодцах), так и в мелких трещинах, порах и капиллярах горных пород, под воздействием приливов и отливов также находятся в движении.

При отливах, когда земная кора сжата, вода под давлением поднимается в скважинах и колодцах. Происходит инверсия явления: опускание земной поверхности и поднятие воды. Во время приливов среда расширяется и происходит опускание воды. В работе [12] приводятся сведения об измерениях уровня воды в колодцах и скважинах, подтверждающие такой характер связи с приливными явлениями. Колебания уровня воды по этим данным составляют 2-3 см.

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 изменении 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.

По результатам выполненных экспериментальных измерений с использованием СНЧ-радиоустановки можно сделать вывод о том, что при возможном влиянии колебаний зеркала грунтовых вод вблизи земной поверхности главным фактором в изменениях  $\rho_k$  является изменение водонасыщенности горной породы на достаточно большой глубине за счет проникновения флюидов в мелкие трещины и поры под воздействием приливных явлений. Для используемой частоты 80 Гц и приведенных выше параметров геоэлектрического разреза глубинность исследования составляет в точке измерений около 1000-1500 м. В этих условиях можно ожидать достаточно существенного вклада глубоких горизонтов разреза, залегающих значительно ниже зеркала грунтовых вод.

Рассмотренный механизм вариаций удельного электрического сопротивления горных пород при изменении их напряженного состояния под воздействием приливных явлений согласуется с данными лабораторных измерений на образцах с относительно небольшим содержанием воды (изверженные или плотные осадочные горные породы). Для более водонасыщенных горных пород (рыхлые осадочные или трещиноватые изверженные горные породы) наблюдается обратная зависимость: при сжатии образцов происходит увеличение удельного сопротивления [13]. В этом случае форма распределения флюида в горной породе носит взаимосвязанный характер и при повышении давления происходит пережим пор и капилляров. В итоге нарушается непрерывность пронизывающей горную породу флюидной сети и удельное сопротивление породы увеличивается. Результаты исследований с обратным характером зависимости вариаций кажущегося сопротивления от деформации среды, вызванных приливными явлениями, будут изложены в отдельной публикации.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. В статье проанализированы результаты предшествующих исследований взаимосвязи приливных явлений и вариаций кажущегося удельного электрического сопротивления при прогнозе землетрясений. Отмечено, что приливные явления ранее использовались при разработке методик электромагнитного мониторинга напряженного состояния геологической среды.

2. Проведенные расчеты приливных деформаций земной коры в точке экспериментальных работ на Карельском перешейке показали, что наиболее значительная амплитуда смещения 20 см характерна для вертикального направления. Горизонтальные деформации менее заметные (6-9 см), при этом их максимумы смещены по времени относительно вертикальной деформации.

3. По данным экспериментальных работ, выполненных с использованием СНЧ-радиоустановки "Зевс" и приемного аппаратно-программного комплекса АКФ-2.2, отмечены суточные вариации кажущегося удельного сопротивления величиной 7 %. Установлено, что эти вариации связаны с деформациями земной коры, вызванными приливными явлениями. Учитывая изменчивость проявления приливных деформаций в зависимости от полусуточных и суточных периодов и увеличение их амплитуды ближе к экватору, в

сейсмоопасных районах России и других стран можно ожидать еще более заметных вариаций  $\rho_k$ , вызванных приливными явлениями.

4. Для повышения достоверности прогнозирования землетрясений необходим учет влияния приливных эффектов, величины которых сопоставимы с изменениями  $\rho_k$ , предшествующими землетрясениям. Вызванные приливными явлениями вариации  $\rho_k$  могут быть достаточно точно вычислены с использованием соответствующих уравнений корреляционных связей, полученных по материалам экспериментальных работ и данным расчетов деформаций земной поверхности.

5. Показана высокая степень корреляции значений кажущегося удельного электрического сопротивления, определенных по данным измерений импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки, и вертикальных деформаций земной поверхности, вызванных приливными явлениями. Коэффициент корреляции между сглаженными значениями  $\rho_k$  и деформациями  $dH$  составляет 0,95. Наблюдаемые вариации импеданса и  $\rho_k$  связаны с изменениями удельного электрического сопротивления породы и объясняются "эффектом губки". Уменьшение  $\rho$  происходит при сжатии земной коры во время отлива и притоке воды в мелкие поры, трещины и капилляры горной породы с образованием сети взаимосвязанных пленок и каналов. Увеличение  $\rho$  происходит при растяжении земной коры во время прилива и оттоке флюидов из мелких трещин, пор и капилляров, в результате чего форма распределения воды в горной породе приобретает островной, с меньшей степенью связи, характер.

6. При проведении измерений реализована достаточно высокая точность измерения импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. Погрешность определения кажущегося сопротивления по данным измерений импеданса, достигнутая в ходе экспериментальных работ, составляет  $\pm 0,6\%$ . Это позволило уверенно зарегистрировать связанные с приливами суточные изменения  $\rho_k$  величиной 7%.

7. Анализ перспектив применения СНЧ-радиоустановки "Зевс" для изучения напряженного состояния геологической среды и результаты выполненных экспериментальных работ показывают, что с использованием приемных аппаратурно-программных комплексов АКФ-2.2 могут быть созданы эффективные системы прогноза землетрясений в сейсмоактивных районах России и сопредельных стран.

Работа выполнена при поддержке программы "Университеты России", проект № 2140, и ФЦП "Интеграция", проект № 326.66.

#### Список литературы

1. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
2. Рудничная геоэлектрика / Под ред. Н. В. Мельникова. Кемерово, 1977. 210 с.
3. Барсуков О.М., Сорокин О.П. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Физика Земли. 1973. № 10. С. 100-102.
4. Светов Б.С. Электромагнитный мониторинг сеймотектонических процессов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1992. № 2. С. 99-115.
5. Сараев А.К., Косткин П.М. Закономерности изменений электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Москва'97: Тез. докл. междунар. конф. 15-18 сентября 1997 г. М., 1997. С. В1.8.
6. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
7. Альтгаузен Н.М., Барсуков О.М. О временных вариациях электропроводности // Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука, 1970. С. 104-110.
8. Авагимов А.А., Атаев А.и., Атаев С.А. и др. Связь аномальных измерений 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.
9. Парийский Н.Н. Земные приливы и внутреннее строение Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 2. С. 193-215.
10. Mathews P.M., Dehant V., Gibson J.M. Tidal station displacements // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. N B9. P. 20469-20477.
11. Пертель М.И., Харламов М.М., Сараев А.К. Комплексирование АМТ-зондирований с измерениями полей СНЧ-радиоустановки // Закономерности эволюции земной коры: Тез. докл. междунар. конф., С.-Петербург, 15-18 октября 1996 г. СПб., 1996. С. 1-265.
12. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
13. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.

**Сараев А.К., Пертель М.И., Парфентьев П.А., Прокофьев В.Е., Харламов М.М. (1999)**  
**Экспериментальные исследования электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки для**  
**целей мониторинга сейсмической активности на Северном Кавказе // ФИЗИКА ЗЕМЛИ.**  
1999. № 2. с. 17-24

Институт земной коры Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург,  
aks@AS1002.spb.edu

Рассмотрены предпосылки применения СНЧ-радиоустановки, мощного источника гармонически изменяющегося сверхнизкочастотного электромагнитного поля, для мониторинга сейсмической активности. Приведена краткая характеристика использовавшейся измерительной аппаратуры АКФ-2. Выполнен анализ результатов экспериментальных работ на Северном Кавказе. Показаны возможности регистрации сигналов СНЧ-радиоустановки на расстоянии 2700 км в направлении, близком к минимуму ее диаграммы направленности (экваториальная область антенной системы). Оценена временная стабильность импеданса, характеризующая перспективы использования СНЧ-радиоустановки при прогнозировании землетрясений. Сравниваются результаты измерений полей СНЧ-радиоустановки и естественных электромагнитных полей.

### **Введение**

В общем комплексе методов, нацеленных на прогнозирование землетрясений, важное место занимают электромагнитные зондирования с повышенной глубиной исследований, позволяющие получать информацию об изменениях удельного электрического сопротивления  $\rho$  горных пород на достаточно больших глубинах, где не проявляется влияние сезонных факторов, а также можно ожидать более заметные вариации величин  $\rho$  за счет приближения к области формирующегося очага землетрясения. Результаты геоэлектрических исследований [Барсуков, Сорокин, 1973] показывают, что изменения кажущегося сопротивления  $\rho_k$  обычно наблюдаются в период времени от нескольких месяцев до нескольких дней перед землетрясением, и применение этих методов ориентировано на средне- и краткосрочный прогноз землетрясений.

Величины вариаций  $\rho_k$  в периоды подготовки землетрясений, установленные по результатам глубинных зондирований, составляют от нескольких до 10—20% [Светов, 1992]. Вариации  $\rho_k$  могут отражать как изменения удельного сопротивления горных пород на глубине, и они должны возрастать при увеличении глубинности используемых методов по мере приближения области исследования к формирующемуся очагу землетрясения, так и изменения  $\rho$  в тензочувствительных зонах, отражающих реакцию геологической среды на процессы подготовки землетрясений. Учитывая то обстоятельство, что объекты электромагнитных исследований (тензочувствительные зоны, области, близкие к формирующимся очагам землетрясений) имеют ограниченные размеры и могут располагаться на различных, в том числе и на достаточно больших глубинах, изменения удельного сопротивления горных пород непосредственно в этих областях могут быть более значительными по сравнению с наблюдаемыми на поверхности земли вариациями кажущегося сопротивления. Наиболее заметные изменения  $\rho_k$  должны отмечаться при оптимальном расположении систем наблюдений относительно тензочувствительных зон и областей формирующихся очагов землетрясений и достаточной глубинности исследований. Однако установки используемых методов не всегда будут располагаться оптимальным образом и сами методы могут иметь недостаточную глубину, поэтому для регистрации относительно небольших изменений величин  $\rho_k$  при мониторинге сейсмической активности необходимо обеспечить высокую точность измерений (не менее десятых долей - первых единиц процентов).

В 70-80-х годах для целей прогноза землетрясений проводились работы методами частотного зондирования (ЧЗ) и зондирования становлением поля (ЗС) с использованием электромагнитных полей МГД-генераторов и мощных электроимпульсных систем [Журавлев, Зейгарник, Сидорин, 1992; Проявление..., 1993]. С помощью таких источников удавалось достичь в одиночных импульсах величин тока до нескольких тысяч ампер, что обеспечивало высокую помехозащищенность измерений и давало возможность получить необходимую глубину исследований. Благодаря этим работам глубинные электромагнитные зондирования вошли в настоящее время обязательной составной частью в систему сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений [Соболев, 1993; Федеральная система..., 1995].

Вместе с тем, использование импульсных источников позволяет получать с достаточно высокой точностью только небольшие фрагменты кривых ЧЗ, которые соответствуют первым гармоникам спектров частот и большим значениям отношений сигнала к помехе. Для других частей кривой ЧЗ погрешность определения  $\rho_k$  может достигать 10 и более процентов [Проявление геодинамических процессов.... 1993], что превышает допустимые при мониторинге сейсмической активности пределы. Из-за отсутствия высоких частот в спектрах зондирующих импульсов для изучения верхней части разреза приходится использовать малоглубинные модификации электрических зондирований. Следует отметить и такую особенность работы МГД-генераторов, как неповторяемость формы импульсов тока в источнике. В результате существенно снижается возможность их использования для режимных наблюдений за вариациями удельного сопротивления горных пород при решении прогностических задач.

### **Предпосылки использования СНЧ-радиоустановки для мониторинга сейсмической активности**

Опыт применения методов электроразведки переменным током показывает, что высокую точность измерений в широком диапазоне частот можно обеспечить при использовании гармонически изменяющихся электромагнитных полей контролируемых источников. Значительные перспективы для мониторинга сейсмической активности имеет применение в качестве источника электромагнитного поля мощной сверхнизкочастотной (СНЧ) радиоустановки, расположенной на Кольском п-ове [Panfilov, Pesin, Saraev et al., 1992].

СНЧ-радиоустановка состоит из генератора синусоидального тока и горизонтально расположенной, ориентированной в широтном направлении и заземленной на концах антенны длиной около 60 км. Величина тока в антенне достигает 300 А. В настоящее время радиоустановка может излучать сигналы сверхнизких частот в диапазоне от 30 до 200 Гц. В дальнейшем планируется расширение частотного диапазона в сторону крайне низких частот до 0.1 Гц. С помощью СНЧ-радиоустановки возможно проведение работ методом сверхнизкочастотного зондирования (СНЧЗ) на основе измерений сигналов источника по сетке частот и методом сверхнизкочастотного профилирования (СНЧП) на одной частоте.

При использовании таких источников имеется принципиальная возможность достичь требуемой точности измерений в десятые доли - первые единицы процентов. Применение гармонически изменяющихся полей позволяет обеспечить за счет синхронного накопления необходимую помехоустойчивость измерений. Преимуществом использования СНЧ-радиоустановки при мониторинге сейсмической активности по сравнению с другими методами электромагнитных зондирований (с помощью МГД-генератора, с использованием естественных полей) является свойство стационарности поля данного источника. При этом для получения необходимой точности измерений можно использовать требуемую длительность накопления. По сравнению с зондированиями на постоянном токе, в которых меняются разности установки и соответственно условия в районе приемных электродов, применение СНЧ-радиоустановки позволяет реализовать такое преимущество частотных зондирований, как сохранение идентичности условий в одной точке измерения.

Нормальное поле заземленного кабеля конечной длины или горизонтального электрического диполя, которыми может быть аппроксимирована антенная система СНЧ-радиоустановки, достаточно полно теоретически исследовано, что дает возможность использовать для определения кажущегося сопротивления различные характеристики поля (отдельные составляющие, отношения составляющих электрического или магнитного полей, импедансы), а также позволяет изучать возможные в процессе подготовки землетрясения изменения пространственной ориентировки векторов электрического и магнитного полей. Для гармонически изменяющихся полей детально разработаны теоретические основы метода частотных зондирований, как для ближней, так и для дальней зоны, и это позволяет выполнять достоверную интерпретацию результатов зондирований. Использование сверхнизких частот обеспечивает достаточно большую глубину исследования, при которой практически исключается влияние мешающих сезонных факторов, а в благоприятных условиях (районы развития пород с высоким удельным электрическим сопротивлением) могут изучаться части разреза, приближающиеся к области подготовки землетрясения. Измерения сверхнизкочастотных электромагнитных полей, характеризующихся значительной мощностью скин-слоя, дают возможность получать интегральные, достаточно устойчивые характеристики больших объемов пород, что повышает надежность прогноза.

СНЧ-радиоустановка является достаточно мощным источником, и ее электромагнитное поле может быть измерено на весьма обширных территориях во всех сейсмоопасных районах России. Это позволяет обеспечить прогностические полигоны однотипной приемной аппаратурой и выполнять измерения и обработку результатов на единой методической основе с единой формой представления результатов. Важным обстоятельством широкого использования СНЧ-радиоустановки при мониторинге является относительно невысокая стоимость работы источника (на конец 1995 г. - около 30 тыс. руб. на один сеанс длительностью 8 мин). Методически необходимым и экономически целесообразным является использование сети наблюдательных станций, при разворачивании которой стоимость излучения СНЧ-радиоустановки для одной точки существенно снижается.

Для оценки возможностей метода СНЧЗ с использованием СНЧ-радиоустановки при мониторинге сейсмической активности в декабре 1995 г. были проведены экспериментальные работы на Кавминводском прогностическом полигоне (г.г. Пятигорск, Эссентуки, Кисловодск). Работы были поставлены по инициативе МЧС России. Организация экспериментальных работ проводилась совместно с Центром международного сотрудничества в области экологии (Центром ИНЭНКО) и Российским институтом мощного радиостроения (РИМРОм). Непосредственно полевые экспериментальные исследования и обработка результатов выполнялись специалистами Института земной коры Санкт-Петербургского университета при содействии сотрудников Центра "Геон" и его Южного филиала. Задачами работ было изучение возможностей и особенностей регистрации сигналов СНЧ-радиоустановки на Северном Кавказе, оценка временной стабильности сигналов данного источника и возможности его использования для мониторинга сейсмической активности.

### **Измерительная аппаратура**

При проведении работ использовался двухканальный вариант созданной в НИИЗК СПбГУ аппаратуры корреляционных функций АКФ (прибор АКФ-2) метода аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ).



Аналоговая часть аппаратуры представлена двумя усилителями, имеющими ступенчатое переключение аттенюации и возможность подавления сигналов промышленных частот режекторными фильтрами, что обеспечивает линейное преобразование входных сигналов амплитудой от 1 мкВ до 0.3 В в полосе частот от 0.1 до 12800 Гц.

В цифровой части аппаратуры производится накопление автокорреляционных функций  $K_{EE}(\tau)$  и  $K_{HH}(\tau)$ , связанных с горизонтальными составляющими электрического и магнитного полей, а также их взаимной корреляционной функции  $K_{EH}(\tau)$ . Параметры накопления таковы, что при частоте дискретизации 500 Гц рассчитываются спектры этих функций с разрешением 0.1 Гц в полосе шириной 50 Гц или с разрешением 1.6 Гц в полосе шириной 800 Гц. С помощью Фурье-преобразования через корреляционные функции находятся энергетические спектры  $S_{EE}(f)$  и  $S_{HH}(f)$ , по которым определяются значения модулей импеданса  $|Z|$  и кажущихся сопротивлений  $\rho_k$ . Фаза импеданса  $\varphi_z$  вычисляется по реальной и мнимой частям взаимной спектральной плотности сигналов  $S_{EH}(f)$ . Для оценки доли некогерентной части в изучаемых сигналах вычисляются значения коэффициента когерентности  $G_{EH}$ . Величины коэффициентов когерентности позволяют оценивать достоверность получаемых результатов.

Для измерения магнитного поля при проведении работ использовался индукционный датчик с уровнем собственных шумов на частоте 1000 Гц не более 2 фТл/Гц<sup>1/2</sup>. Длина приемной линии для регистрации электрического поля составляла 100 м.

### Характеристика района работ и условий измерений

Район, в котором производились экспериментальные работы, находится на расстоянии 2700 км от СНЧ-радиоустановки (рис. 1) и расположен вблизи экваториальной зоны антенной системы (угол между ориентировкой антенны и направлением на г. Пятигорск составляет около 70°).

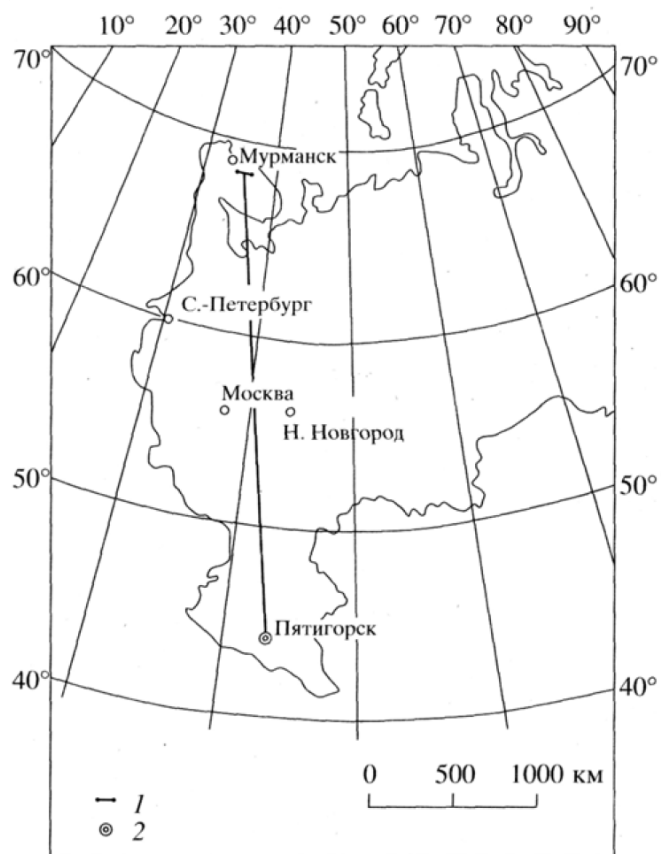


Рис. 1. Схема расположения СНЧ-радиоустановки (1) и района проведения экспериментальных работ.

Полевые экспериментальные работы выполнялись в период с 14 по 20 декабря 1995 г. утром с 11<sup>00</sup> до 12<sup>08</sup> и вечером с 15<sup>00</sup> до 16<sup>08</sup> на частотах 31.2, 41.6, 62.5, 83.3, 125.0, 166.6 Гц, излучавшихся последовательно по 8 мин с паузами по 4 мин. В статье анализируются результаты измерений поля СНЧ-радиоустановки в двух точках: № 2 (поселок им. Чкалова), расположенной на расстоянии 15 км в северо-западном направлении от г. Эссентуки и № 4 (поселок Лысогорская), расположенной на расстоянии 15 км в восточном направлении от г. Пятигорск.

В районе точки № 2 осадочные отложения чехла мощностью около 1200 м представлены песчаниками, аргиллитами, известняками, мергелями мел-палеогенового возраста. Удельное сопротивление этих отложений по данным ВЭЗ меняется от единиц до десятков омметров. Фундамент, сложенный гранитами и гранодиоритами палеозойского возраста, имеет удельное сопротивление несколько тысяч омметров.

В районе точки № 4 общая мощность осадочных отложений чехла, представленных песчаниками, аргиллитами, известняками, мергелями, глинами и суглинками юрского-неогенового возраста, составляет около 2500 м. Для верхней части разреза мощностью около 700 м характерны значения удельного сопротивления единицы омметров, а нижняя часть осадочной толщи имеет удельное сопротивление от единиц до нескольких десятков омметров. Фундамент в районе точки № 4 представлен сланцами карбонового возраста с

удельным сопротивлением десятки омметров.

На всех точках выполнялись исследования методом АМТЗ с четырехканальной (тензорной) аппаратурой АКФ-4. По результатам зондирований было отмечено отсутствие различий для максимальной и минимальной кривых  $\rho_k$ , что говорит об отсутствии неоднородностей в горизонтальном направлении и достаточность использования при измерениях полей СНЧ-радиоустановки двухканальной (скалярной) аппаратуры АКФ-2.

По данным АМТЗ в точке № 2 установлен трехслойный, а в точке № 4 - двухслойный тип геоэлектрического разреза со следующими значениями удельных сопротивлений и мощностей пластов:

Точка № 2	Точка № 4
$\rho_1 = 4.7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $h_1 = 64 \text{ м}$	$\rho_1 = 4.6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $h_1 = 54 \text{ м}$
$\rho_2 = 2.2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $h_2 = 132 \text{ м}$	$\rho_2 = 2.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
$\rho_3 = 8.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	

Перед началом измерений полей СНЧ-радиоустановки были изучены спектры промышленных помех в районе работ. Такие исследования необходимы в связи с тем, что пункты комплексных наблюдений полигона нередко размещаются вблизи или непосредственно в населенных пунктах, и для оценки возможности мониторинга, а также получения гарантий надежной работы измерительной аппаратуры, следует удостовериться, что уровень промышленных помех не превышает допустимых пределов, при которых сложно обеспечить необходимую точность измерений, и даже могут наблюдаться нелинейные искажения в усилительных трактах.

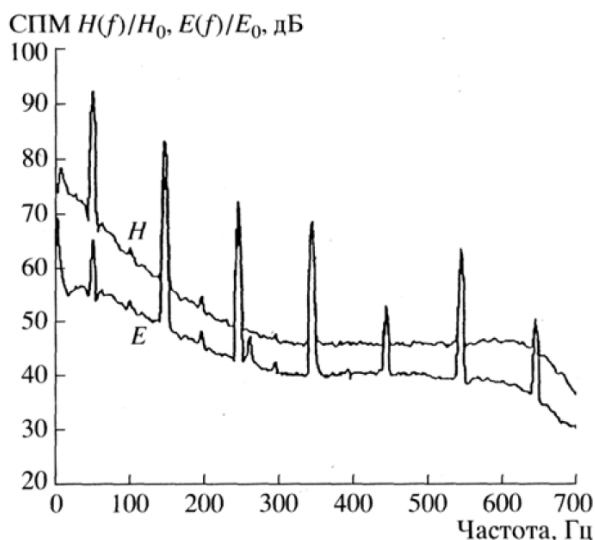


Рис. 2. Спектральные плотности мощности горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей в точке №2.

Оценка отсутствия искажений спектров за счет влияния полей искусственных источников и других помех в выбранных точках измерений качественно производилась нами по характеру регистрации глобальных резонансов естественного электромагнитного поля. Эти резонансы возникают в сферическом волноводе "земля-ионосфера" в частотном диапазоне от единиц до десятков герц, когда длина волны в воздухе соизмерима с длиной окружности Земли. Впервые они были теоретически предсказаны В.О. Шуманом в 50-х годах и затем обнаружены экспериментально. Опыт наших работ с различными модификациями аппаратуры АКФ показывает, что анализ характера записи "шумановских" резонансов необходим для контроля нормальной работы аппаратуры. Как видно из рис. 3. в утреннем и вечернем сеансах измерений резонансные максимумы спектров электрического поля не имеют искажений, при этом уровень сигналов повышается от утреннего к вечернему сеансу.

#### Анализ экспериментальных данных

Одной из главных задач экспериментальных работ было изучение возможностей регистрации составляющих электромагнитного поля на достаточно большом удалении от СНЧ-радиоустановки в экваториальной зоне антенной системы в направлении, близком к минимуму диаграммы направленности данного источника [Сараев, Косткин, 1997]. На рис. 4 приведены результаты измерений полей СНЧ-

На рис. 2 представлены результаты измерений относительных значений спектральных плотностей мощности (СПМ) горизонтальных составляющих электрического  $E(f)$  и магнитного  $H(f)$  полей в диапазоне частот 0-800 Гц, выполненных с помощью аппаратуры АКФ-2 в точке № 2. Как видно из рисунка, на спектрах  $E(f)$  и  $H(f)$  проявляются, в основном, нечетные гармоники промышленной частоты 50 Гц. На частоту 50 Гц в аппаратуре установлен режекторный фильтр с коэффициентом подавления 40 дБ, тем не менее, и на данной частоте выделяются сигналы значительной амплитуды. Однако, в спектре электромагнитного поля имеются спокойные участки, не искаженные промышленными помехами, и эти частотные диапазоны могут быть использованы для измерений повышенной точности.

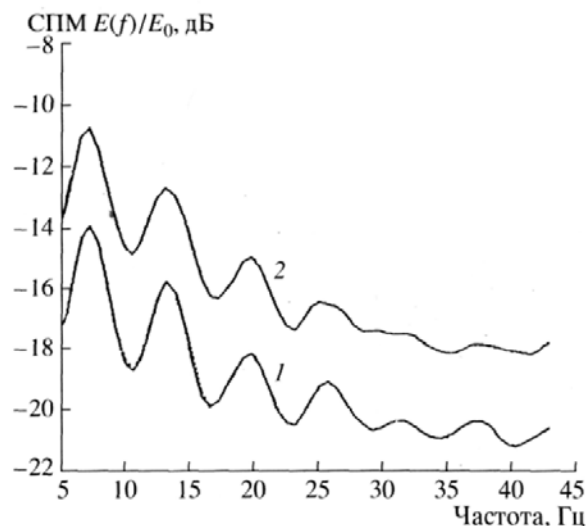


Рис. 3. Примеры регистрации шумановских резонансов естественного электрического поля. 1,2 - спектральные плотности мощности соответственно в утреннем и вечернем сеансах.

радиоустановки в точке № 4 на частотах 125.0 Гц и 166.6 Гц. Из рисунка видно, что более уверенно выделяется сигнал на частоте 166.6 Гц, что связано с более низким уровнем естественного электромагнитного поля на более высоких частотах.

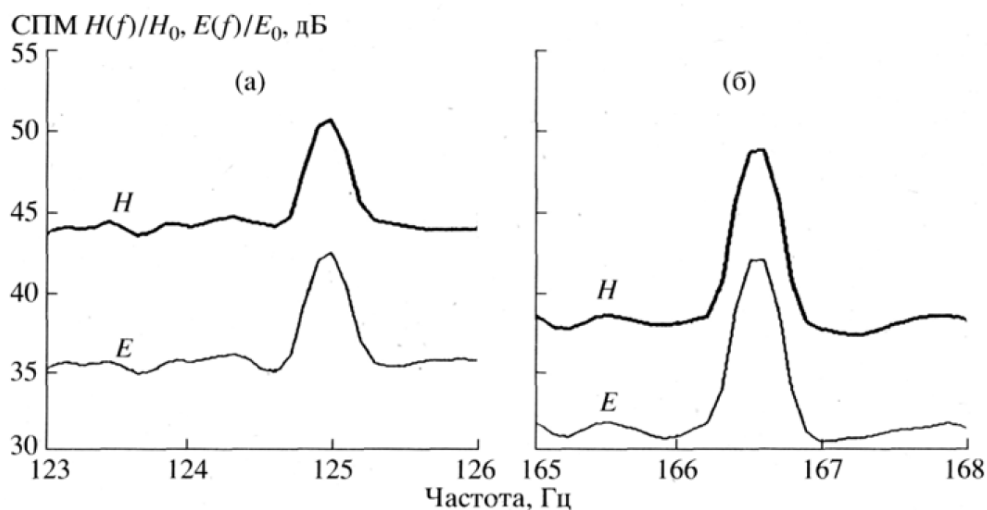


Рис. 4. Примеры регистрации сигналов СНЧ-радиоустановки на частотах 125.0 Гц (а) и 166.6 (б).  $E, H$ -спектральные плотности мощности электрического и магнитного полей.

Более благоприятным временем для выделения сигналов СНЧ-радиоустановки были утренние сеансы. Во время вечерних сеансов возрастал уровень естественных электромагнитных полей, и сигналы радиоустановки проявлялись менее контрастно.

Значения СПМ изучаемых сигналов  $E$  и  $H$  СНЧ-радиоустановки и их превышения над уровнем естественных полей  $\Delta E$  и  $\Delta H$  приведены в таблице. Анализ этих данных показывает, что для электрического и магнитного полей превышения СПМ  $\Delta E$  и  $\Delta H$  примерно одинаковые и составляют для частот 125.0 Гц и 166.6 Гц 6.4-11 дБ во время утренних и 5-8.4 дБ во время вечерних сеансов. На низких частотах сигналы СНЧ-радиоустановки регистрируются менее уверенно и для частот 62.5 Гц и 83.3 Гц превышения  $\Delta E$  и  $\Delta H$  составляет примерно 2.6-4.1 дБ во время утренних и 1.3-2.9 дБ во время вечерних сеансов.

Таблица

**Относительные значения спектральных плотностей мощности сигналов  $E$  и  $H$  СНЧ-радиоустановки и их превышения  $\Delta E$  и  $\Delta H$  над уровнем естественных электромагнитных полей, дБ.**

f, Гц	Утро (11 <sup>00</sup> -12 <sup>08</sup> )				Вечер (15 <sup>00</sup> -16 <sup>08</sup> )			
	$E$	$\Delta E$	$H$	$\Delta H$	$E$	$\Delta E$	$H$	$\Delta H$
Точка № 2 (поселок им. Чкалова)								
41.6	22.0	1.1	36.5	0.9	23.6	1.2	37.3	1.1
62.5	24.1	2.6	36.6	3.2	26.2	1.7	37.6	2.1
83.3	25.4	4.3	35.9	4.1	28.3	3.1	38.6	2.9
125.0	25.9	7.8	34.4	7.6	28.0	5.4	36.3	5.7
166.6	25.1	10.6	38.9	10.1	29.0	8.5	35.6	8.4
Точка № 4 (поселок Лысогорская)								
62.5	39.6	2.4	51.8	2.6	43.7	1.9	55.4	1.3
83.3	41.0	3.7	51.7	3.8	44.2	1.5	54.4	1.3
125.0	42.0	6.6	50.3	6.4	45.4	4.9	53.6	5.0
166.6	41.8	11.0	48.9	11.0	45.0	7.2	51.7	6.9

Приведенные материалы показывают возможности использовавшейся аппаратуры АКФ-2 с разрешением по частоте 0.1 Гц при выделении сигналов СНЧ-радиоустановки в условиях Северного Кавказа. Увеличения соотношения сигнал/шум и более уверенного выделения сигналов можно добиться за счет улучшения разрешения по частоте приемной аппаратуры.

Возможность проведения мониторинга с использованием СНЧ-радиоустановки оценивалась на основе сопоставления результатов измерений в ходе утреннего и вечернего сеансов излучения. Для сопоставления были выбраны частоты 125.0 Гц и 166.6 Гц, поскольку уровень сигналов для них превышает уровень

естественных электромагнитных полей на 5-11 дБ. Как следует из полученных материалов, относительные различия модулей поверхностного импеданса  $Z = E_x/H_y$  в утренние и вечерние сеансы измерений не превышали 2.6% для точки № 2 и 2.1% для точки № 4. Указанные относительно небольшие величины различий говорят о принципиальной возможности измерений полей СНЧ-радиоустановки с высокой точностью и перспективности использования данного источника при прогнозировании землетрясений.

Следует отметить, что если сопоставлять величины не импеданса, а отдельно взятых составляющих электрического и магнитного полей в утреннем и вечернем сеансах измерения с учетом величины тока в антенной системе, то различия будут более значительными и достигнут 30-40%. Это говорит о большой зависимости значений составляющих электромагнитного поля от суточных изменений параметров ионосферы. Приведенные результаты подтверждают известные представления о возможности существенного уменьшения влияния ионосферы на основе измерений импеданса электромагнитного поля.

Важным преимуществом использования полей СНЧ-радиоустановки по сравнению с естественными электромагнитными полями является малая зависимость результатов измерений от времени суток, времени года, погодных условий, что позволяет рассматривать метод СНЧЗ как более пригодный для проведения долговременных круглогодичных наблюдений при мониторинге сейсмической активности. Наглядно преимущества использования метода СНЧЗ иллюстрируются рис. 5 и рис. 6, на которых приведены результаты сопоставления СПМ сигналов СНЧ-радиоустановки на частотах 125.0 Гц и 166.6 Гц и естественного электромагнитного поля в диапазонах частот 121-129 Гц и 162-176 Гц, а также соответствующие им значения  $\rho_k$  и  $\varphi_z$ . Если во время вечернего сеанса, когда уровень естественного электромагнитного поля более высокий, графики частотных зависимостей кажущегося сопротивления по результатам АМТЗ изрезаны мало и коэффициент когерентности достаточно близок к единице, то для утреннего сеанса с более низким уровнем естественного поля графики  $\rho_k$  более изменчивые. При этом значения  $\rho_k$  для утренних и вечерних измерений могут совпадать, но могут и заметно различаться. В то же время для метода СНЧЗ значения  $\rho_k$  в вечернем и утреннем сеансах близки между собой. Аналогичная закономерность наблюдается и для  $\varphi_z$  (рис. 6, б).

Отмеченные особенности результатов измерений полей СНЧ-радиоустановки и естественных электромагнитных полей проявляются на графиках когерентности полей  $E$  и  $H$  (рис. 6, б). Если для сигнала СНЧ-радиоустановки на частоте 166.6 Гц  $G = 1$  как в утреннем, так и в вечернем сеансах, то средние значения  $G$  для естественных полей меняются от 0.95 до 0.98. Эти значения когерентности достаточно высокие, и качество результатов измерений естественного электромагнитного поля здесь можно считать хорошим (в методе АМТЗ удовлетворительным считается качество измерений при  $G > 0.8$ ). Однако, даже для измерений хорошего качества графики  $\rho_k$  в утренних сеансах изрезанные, и значения кажущегося сопротивления в утренних и вечерних сеансах, как видно из рис. 5 и рис. 6, могут заметно различаться. Этим различиям  $\rho_k$  для приведенных диапазонов частот соответствуют различия величин импедансов, в среднем равные 5-7%.

Наряду с изменением уровня естественных электромагнитных полей в течение суток наблюдаются его сезонные колебания с повышением данного уровня летом-осенью и понижением зимой-весной [Александров, Бакленова, Гладштейн и др., 1972]. В этих условиях будет меняться точность измерений методом АМТЗ, а при использовании СНЧЗ указанные факторы будут влиять на точность измерений существенно в меньшей степени.

По результатам измерений СПМ были оценены значения напряженностей электрического и магнитного полей гармонических сигналов СНЧ-радиоустановки на разных частотах. Для определения значений напряженностей  $E$  и  $H$  использовалась методика, основанная на подаче на вход аппаратуры эталонировочного сигнала определенной амплитуды, и величины  $E$  и  $H$  определялись с учетом коэффициентов преобразования

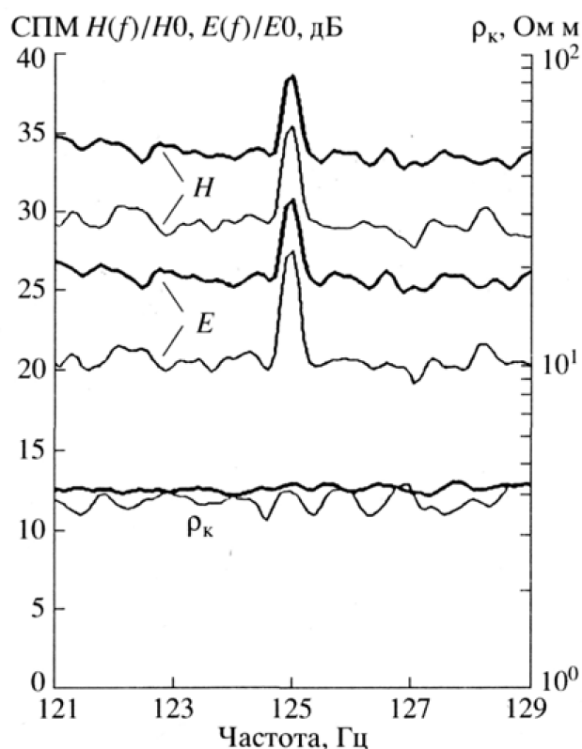


Рис. 5. Сопоставление спектральных плотностей мощности естественного электромагнитного поля в диапазоне частот 121-129 Гц и сигналов СНЧ-радиоустановки на частоте 125.0 Гц, а также графиков кажущегося сопротивления  $\rho_k$  в утреннем (тонкая линия) и вечернем (толстая линия) сеансах.

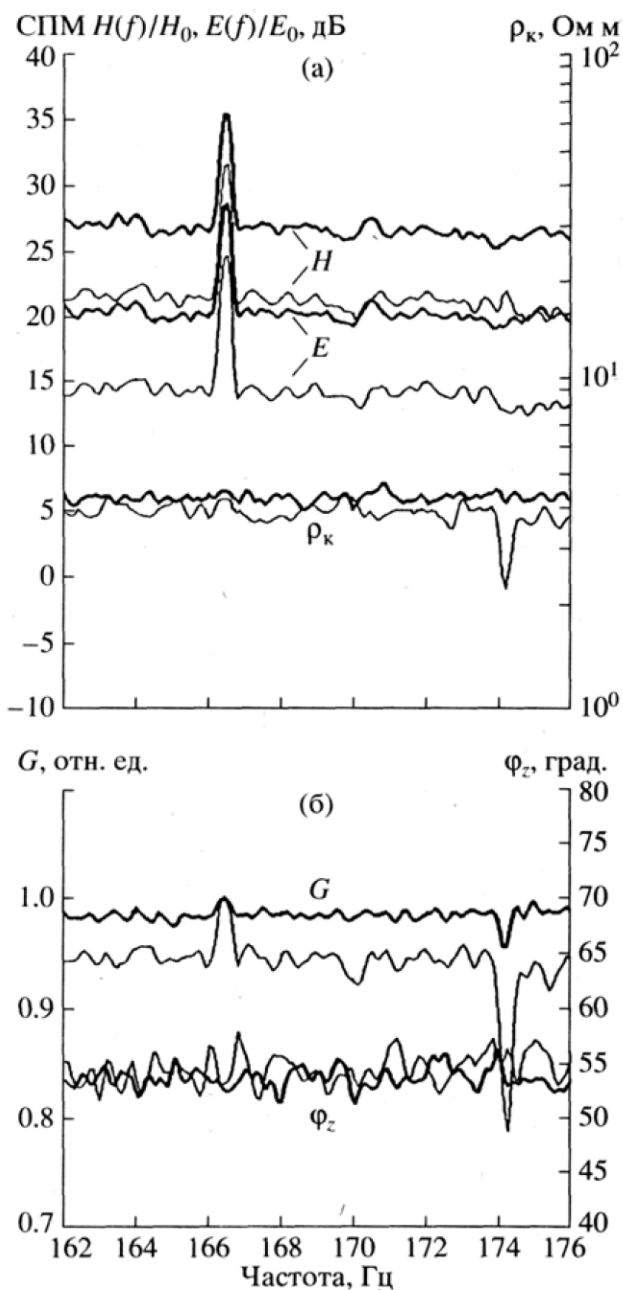


Рис. 6. Сопоставление спектральных плотностей мощности естественного электромагнитного поля в диапазоне частот 162-176 Гц и сигналов СНЧ-радиоустановки на частоте 166.6 Гц, а также графиков кажущегося сопротивления  $\rho_k$ -когерентности  $G$  и фазы импеданса  $\varphi_z$  в утреннем (тонкая линия) и вечернем (толстая линия) сеансах.

АКФ-2 с разрешением по частоте 0.1 Гц превышения СПМ сигналов СНЧ-радиоустановки над уровнем естественных электромагнитных полей для частот 125.0 Гц и 166.6 Гц составляли от 5 до 11 дБ. На частотах 31.2, 41.6, 62.5 и 83.3 Гц превышения менее заметны, и для уверенного выделения сигналов необходимо использовать аппаратуру с более высоким разрешением по частоте.

На основе сопоставления результатов измерений в утреннем и вечернем сеансах показано, что относительные различия модулей поверхностного импеданса для частот 125.0 Гц и 166.6 Гц не превышали 2.1-2.6%. Указанные относительно небольшие величины различий говорят о принципиальной возможности измерений полей СНЧ-радиоустановки с высокой точностью и перспективности использования данного источника при прогнозировании землетрясений. Для получения высокой точности измерений при мониторинге

используемых магнитной и электрической антенн. На рис. 7 приведены графики напряженностей составляющих  $E$  и  $H$  поля СНЧ-радиоустановки в точке № 2 для ориентировки приемной линии электрического поля по азимуту СВ 30°.

Величины токов в источнике при измерениях на разных частотах несколько различались, и на рисунке показаны результаты, приведенные к величине тока в антенной системе, равной 200 А. Эти графики дают представление об уровнях сигналов СНЧ-радиоустановки на Северном Кавказе, которые меняются соответственно в пределах  $(2-4) \cdot 10^{-9}$  В/м и  $(5-7) \cdot 10^{-8}$  А/м. Наблюдаемая частотная зависимость  $E$  и  $H$  обусловлена влиянием особенностей геоэлектрического разреза и ионосферы на результаты измерений.

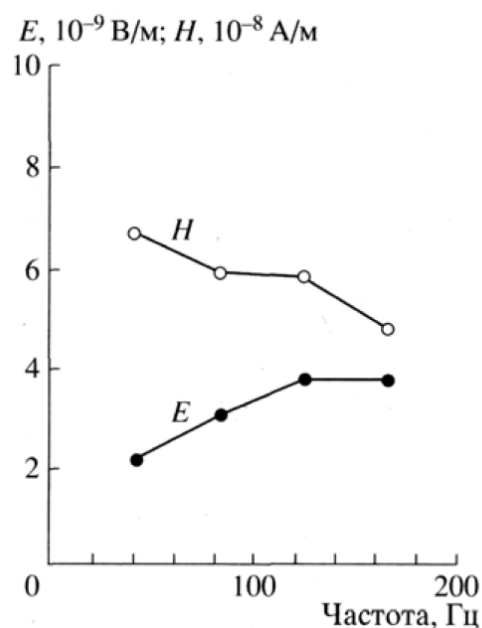


Рис. 7. Характер изменения напряженностей электрического и магнитного полей СНЧ-радиоустановки для частот 41.6, 83.3, 125.0, 166.6 Гц в точке № 2.

### Выводы

В результате выполненных экспериментальных исследований установлена возможность регистрации сигналов СНЧ-радиоустановки на достаточно большом (2700 км) удалении от источника в направлении, близком к минимуму диаграммы направленности антенной системы. Для использовавшейся аппаратуры

сейсмической активности необходима разработка специализированной приемной аппаратуры, методики проведения работ и обработки получаемых данных.

Сопоставление результатов измерений естественных электромагнитных полей и сигналов СНЧ-радиоустановки показало, что метод СНЧЗ более перспективен для мониторинга сейсмической активности. Получаемые по результатам измерений электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки значения  $\rho_k$  и  $\varphi_z$  мало зависят от времени суток. Для метода АМТЗ отмечается более существенная зависимость значений  $\rho_k$  и  $\varphi_z$  от времени суток вследствие колебаний уровня естественного электромагнитного поля.

Статья рекомендована к печати членом редколлегии чл.-корр. РАН А.В. Николаевым.

#### Список литературы

1. Александров М.С., Бакленова З.М., Гладштейн Н.Д. и др. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука, 1972. 196 с.
2. Барсуков О.М., Сорокин О.Н. Изменения кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1973. № 10. С. 100-102.
3. Журавлев В.И., Зейгарник В.А., Сидорин А.Я. Методические вопросы поиска предвестников землетрясений методом частотного электромагнитного зондирования одиночными импульсами // Землетрясения и процессы их подготовки. М.: Наука. 1992. С. 49-64. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях (результаты исследований по международным геофизическим проектам) / Отв. ред. Е.П. Велихов, В.А. Зейгарник. М.: Наука. 1993. 158 с.
4. Сараев А.К., Косткин П.М. Закономерности изменения электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки. Международная геофизическая конференция и выставка "Москва'97". // Тез. докл. конференции, 15-18 сентября, М.: Совинцентр. 1997.
5. Светов Б.С. Электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1992. № 2. С. 99-115.
6. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.
7. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. М.: МЧС России. 1995. № 1. 113 с.
8. Panfilov A.S., Pesin L.B., Saraev A.K. et al. Prospects of the use of low frequencies high-power radio means in fundamental and applied geophysics // Unesco Proceedings. 1992. № 3. P. 78-84.

---

**Zhamaletdinov A. A., Corresponding Member of the RAS Mitrofanov F. P., Tokarev A. D., Shevtsov A. N. (2000) The Influence of Lunar and Solar Tidal Deformations on Electrical Conductivity and Fluid Regime of the Earth's Crust // Doklady Earth Sciences, Vol. 371, No. 2, 2000, pp. 403-407. Translated from Doklady Akademii Nauk, Vol. 371, No. 2, 2000, pp. 235-239.**

Institute of Geology, Kola Research Center, Russian Academy of Sciences, Russia; e-mail: [zham@az2608.spb.edu](mailto:zham@az2608.spb.edu)

The study of the influence of lunar and solar tide-forming forces on the shape of the Earth's surface and on the character of geophysical fields constitutes one of the fundamental problems in the physics of the Earth. Among geophysical phenomena accompanying tidal deformations, the study of variations in the electrical conductivity of rocks is of special interest, since this information can be directly related to the fluid regime in the Earth's crust. The first positive experience of such measurements was gained in Japan at the beginning of 1960s in connection with the problem concerning the monitoring of electromagnetic forerunners of earthquakes [1]. The "Zevs" powerful source of ultralow-frequency (ULF) radiation was for the first time used for the study of tidal phenomena in the work [2]. The monitoring was carried out at a distance of 950 km from the antenna at a low signal/interference ratio. The present work describes the experiment of electromagnetic monitoring in conditions of a large excess of the useful signal over the interference (by a factor of ~50) at a distance of 180 km from the "Zevs" source. Owing to this, as well as to a higher tensosensitivity of electrical resistance of the Earth's crust in the region of investigations, we have succeeded in revealing and describing a number of basically new features characterizing the influence of tides on the electrical conductivity of the Earth's crust and in relating them to the parameters of the fluid regime of the Earth's interior.

The measurements were conducted at the Avva-Guba test site located in the southwestern part of the Kola Peninsula. The positions of the observation point and the "Zevs" radiating antenna are shown in Fig. 1. The "Zevs" antenna represents an earthed 60-km-long power transmission line. The magnetic moment of the source attains  $2 \times 10^{11}$  A m<sup>2</sup> [3]. The line is oriented latitudinally. The current with the strength 300 A and the frequency 83.3 Hz was supplied to the antenna in the course of monitoring. The current was supplied in separate 6-min-long series at 30 min intervals during 2 days.

The signals were recorded using the SChZ-95 frequency sounding station working in the narrow-band regime on the principle of super heterodyne [4]. Four components of the field, i.e., two electrical ( $E_x$ ,  $E_y$ ) and two magnetic ( $h_x$ ,  $h_y$ ), oriented along the magnetic latitude (the  $X$  axis) and the meridian (the  $Y$  axis), were measured. The results of

detailed reconnoitering works have demonstrated a high homogeneity of the section at the receiving point and an absence of the local  $S$ -effect. In the regional plan (Fig. 1), the Avva-Guba receiving point and the “Zevs” radiating antenna are situated within vast quasi-homogeneous poorly-conductive blocks of the Earth's crust, far from the large conductivity anomalies [5].

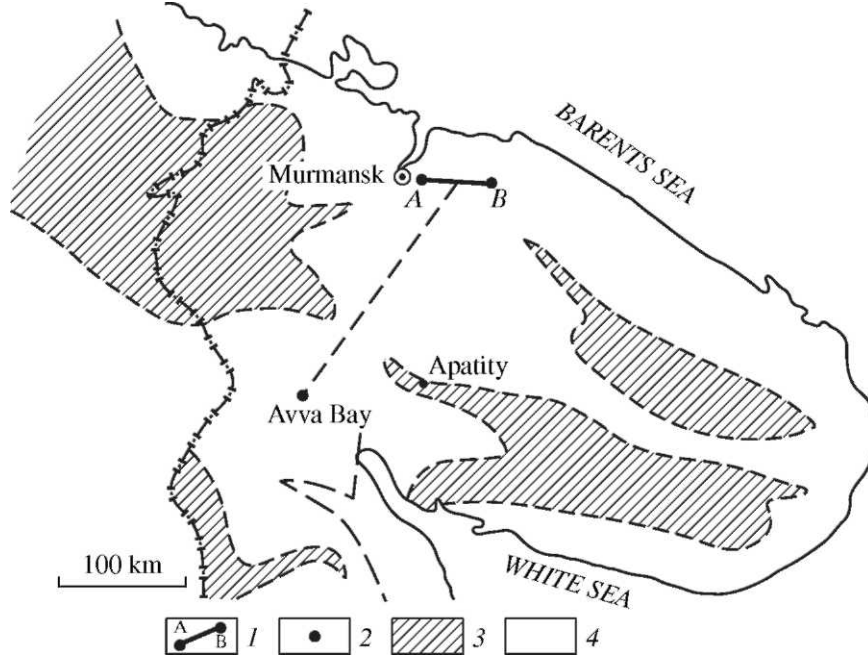


Fig. 1. Position of the region of monitoring in the “Zevs” source field. (1) “Zevs” source of ULF radiation; (2) Avva-Guba point of signal receiving; (3) blocks with an increased electrical conductivity of the Earth's crust; (4) low-conductive, more homogeneous blocks of the Earth's crust (proto basement).

The results of electromagnetic monitoring are presented in Fig. 2 in the form of four panels, each containing the graph representing variations  $dH$  of the vertical component of tidal deformation calculated theoretically for the Avva-Guba point. The calculations were accomplished by A.K. Saraev in the Institute of Applied Astronomy, RAS, using the algorithm of [6] accepted as an international standard. The  $dH$  curve in Fig. 2 is compared to plots for temporal trend of the apparent resistivity  $\rho_T^{xy}$  and  $\rho_T^{yx}$  and plots for variations of the phase difference between the conjugated components of electrical and magnetic fields for the input impedances  $Z_{xy}$  and  $Z_{yx}$ .

The apparent resistivity was calculated by the impedance relationships for the wave zone conductions:

$$\rho_T^{xy}(\omega) = \frac{|E_x(\omega)|^2}{|H_y(\omega)|^2} \cdot \frac{1}{\omega\mu_0};$$

$$\rho_T^{yx}(\omega) = \frac{|E_y(\omega)|^2}{|H_x(\omega)|^2} \cdot \frac{1}{\omega\mu_0},$$

where  $\omega = 2\pi f$  is the cyclic frequency in radians,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ HA}^{-1}$  is the magnetic permeability of air.

Visual comparison of the theoretical  $dH$  curve and experimentally recorded variations of the apparent resistivity and phase of impedances  $Z_{xy}$  and  $Z_{yx}$  reveals their distinct relation to one another (Fig. 2). It can be seen that the  $\rho_T^{xy}$  and  $\rho_T^{yx}$  values vary in antiphase with the Earth's surface topography changes. The decrease of apparent resistivity  $\rho_T$  corresponds to the relief rise (tide), and vice versa. The full amplitude of the Earth's surface oscillations is 8 cm from peak to peak. The maximum amplitude of apparent resistivity variations is 22.5% along the latitudinal component  $\rho_T$  coinciding with the plane of ecliptic, and 11% along the meridional component. The average scatter with respect to the envelope curve is 2.5%. The accuracy of readings within separate realizations is 0.5%.

The relation of phase curves with tidal deformations is expressed more clearly, as compared to the curves of resistance (Fig. 2). This relation is directly proportional, i.e., the increase of phase difference corresponds to the relief rise (tide) and vice versa. The maximum amplitude of phase variations attains  $12^\circ$  at the average scatter  $1^\circ\text{-}2^\circ$ .

The analysis of experimental data in the spectral region is of particular interest (Fig. 3). The spectrum of tidal deformations  $S^{dH}$  has two (diurnal and weaker semidiurnal) harmonics. The spectrum of latitudinal component for the experimental  $\rho_T$  curve has a similar shape; whereas, the diurnal harmonic alone is expressed in the  $\rho_T^{xy}$  spectrum. We have already mentioned above that the latitudinal component  $\rho_T^{xy}$  coinciding with the plane of ecliptic is doubly sensitive to tides. Thus, the tensor character of lunar and solar tidal deformations is manifested.

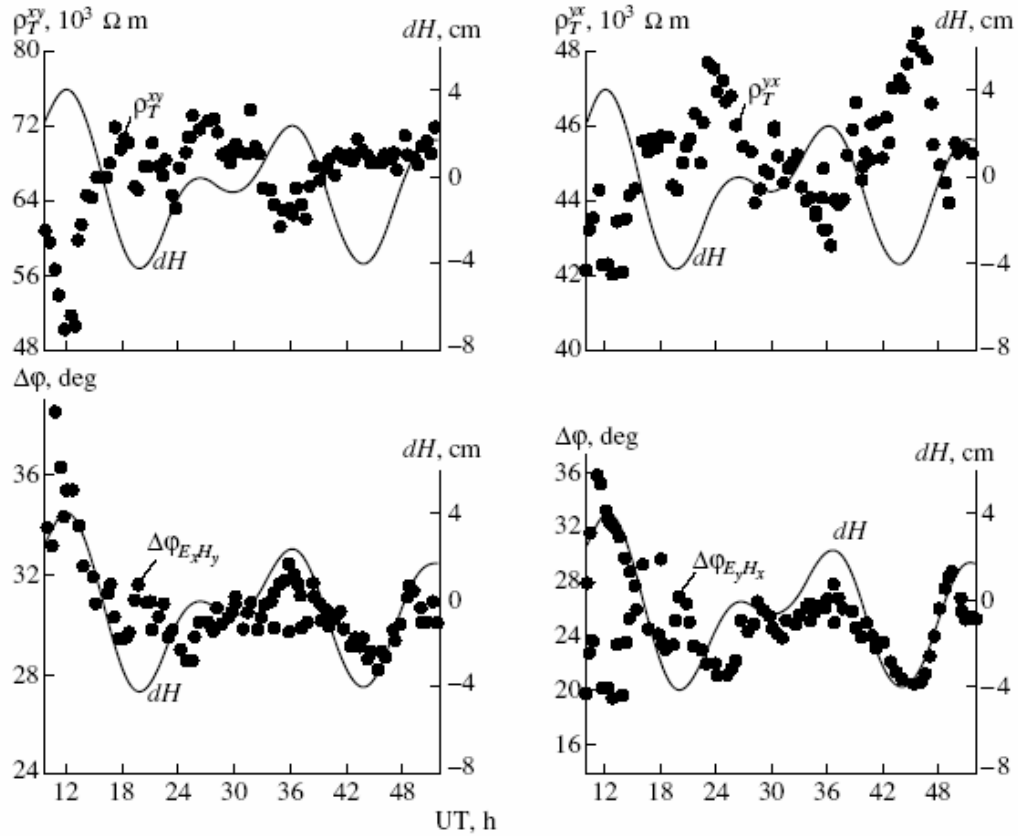


Fig. 2. Results of electromagnetic monitoring at the Avva-Guba point. ( $dH$ ) curve of variations of the vertical component of tidal deformations; ( $\rho_T^{xy}$  and  $\rho_T^{yx}$ ) apparent resistivity values based on impedances  $Z_{xy}$  and  $Z_{yx}$ , respectively;  $\Delta\varphi_{E_x H_y}$ ,  $\Delta\varphi_{E_y H_x}$  differences of phases between the  $E_x H_y$  and  $E_y H_x$  components, respectively.

The results of processing the amplitude and impedance phase by the least-squares method are presented in Fig. 4. According to these data, the variations of  $\rho_T$  and the impedance phase  $\Delta\varphi$ , depending on the change of vertical component of tidal deformations  $dH$ , are described by the following linear regression equations with the mutual correlation coefficient  $C_{cor}$  within 0.6-0.8.

$$\rho_T^{xy} = 66 - 1.2 \times dH, \text{ k}\Omega \text{ m},$$

$$\Delta\varphi_{xy} = 31 + 0.53 \times dH, \text{ deg};$$

$$\rho_T^{yx} = 45 - 0.42 \times dH, \text{ k}\Omega \text{ m},$$

$$\Delta\varphi_{yx} = 26 + 1.05 \times dH, \text{ deg}.$$

Among the results presented in Figs. 2 and 4, it is most important to note the observed different signs of relative variations of the apparent resistivity and impedance phase. The apparent resistivity ( $\rho_T$ ) growth is accompanied by the phase diminishing and vice versa. In accordance with the dispersion relationships for the components of impedance,  $\rho_T$  and  $\Delta\varphi$  are related to one another by the approximate Weidelt formula [7]

$$\Delta\varphi_T(T) = \pi/4 (d \log(\rho_T(T^{1/2}))/d \log(T^{1/2}))$$

It follows from the expression presented that the behavior of amplitudes and phases observed in Figs. 2 and 4 can be physically explained only in the case when it is assumed that the measurements are conducted on the descending branch of the  $H$ - or  $KH$ -type  $\rho_T(T^{1/2})$  curve. In this case, the very fact of the observed phase dispersion points to the existence of a conductive layer at some depth. This in turn suggests that the noted diurnal variations of the apparent resistivity and phase are of the conductive origin and encompass the entire upper sequence of the Earth's crust to the depth  $H$  comparable with the skin-layer thickness  $\delta = \lambda / 2\pi$ , where the wavelength  $\lambda = (10^7 \rho / f)^{1/2}$ . In the investigated region, the average value  $\rho = 5 \times 10^4$  Ohm m. Hence, it is not difficult to determine that the depth  $H$  at the frequency  $f = 83.3$  Hz is 7-8 km.



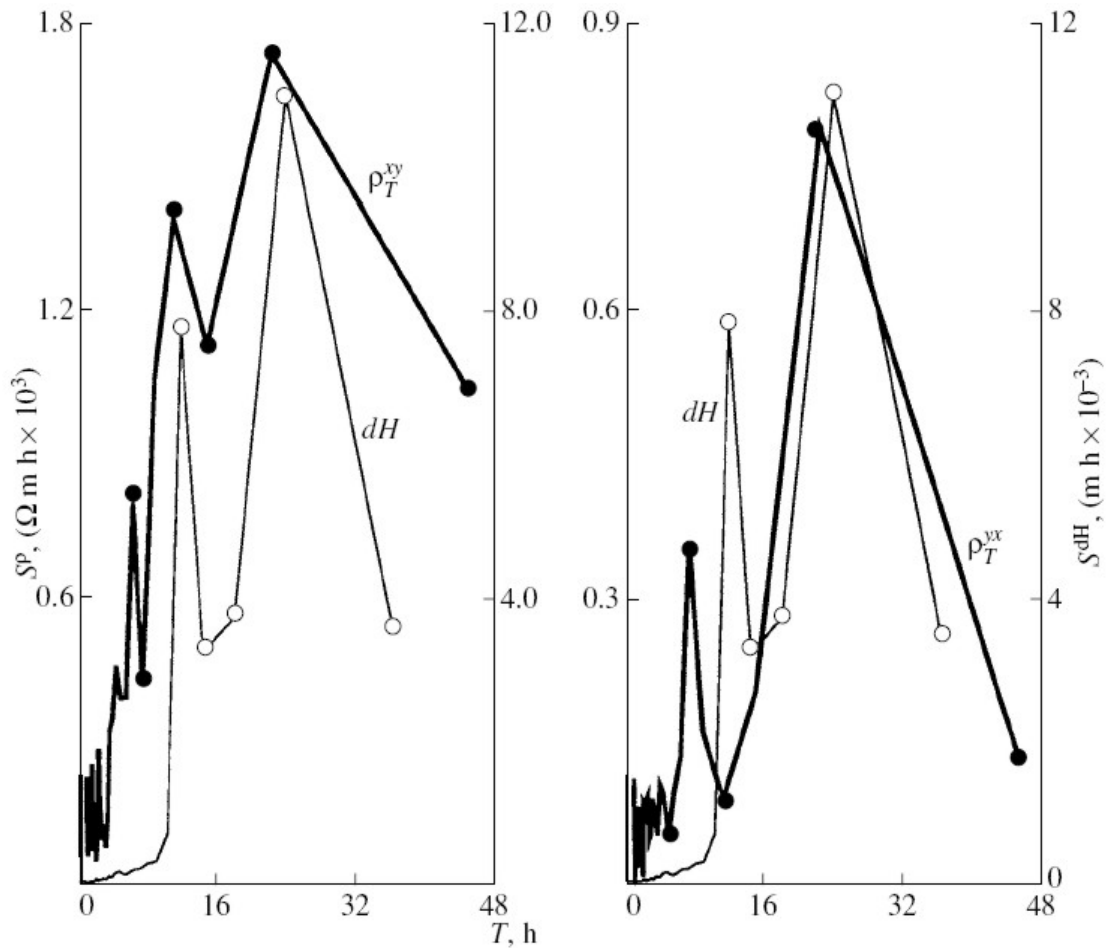


Fig. 3. Spectra of variations of the apparent resistance  $p$  and vertical component  $dH$  of tidal deformations of the Earth's crust based on results of monitoring at the Avva-Guba point; ( $\rho_T^{xy}$ ) latitudinal component, ( $\rho_T^{yx}$ ) meridional component.

Therefore, the accomplished analysis of the results of electromagnetic monitoring at the Avva-Guba test site allows us to conclude that the specific electrical resistance diminishes in the upper layer (thickness  $\sim 7-8$  km) during the Earth's crust rise (extension) under the action of tides and the resistance grows in the phase of compression (lowering). In this case, one may suppose that an intermediate layer (depth interval 3-7 km) with a reduced resistance makes the largest contribution to the diurnal variations of electrical conductivity. The existence of a zone with a reduced resistance at these depths has been established previously from the data of frequency soundings with a controllable source at the Kola Peninsula and in Central Finland [8]. It may also be noted that, according to the data of electrical logging of the Kola superdeep borehole, the maximum fracturing and electrical anisotropy of rocks are observed at the same depths (5-8 km) [9].

The theoretical interpretation of the obtained experimental data on the monitoring of tidal phenomena can be carried out in the framework of the dilatation-diffusion model described for the first time on the basis of analysis of seismic forerunners of earthquakes at the Garm test site [10]. One can suppose the pressure decrease and microscopic crack opening (dilatancy) during the phase of extension owing to the Earth's surface rise (tide). This phenomenon results in a partial drawing of fluids from closed pore spaces into opened voids, the increase of the number of connected current-conducting channels, and the growth of electrical conductivity of rocks. On the contrary, the phase of compression (ebb) is characterized by the consolidation of rocks and the closing of free cracks. As a consequence, fluids are squeezed out into closed pore spaces, the amount of connected current-conducting channels diminishes, and, accordingly, the electrical conductivity of rocks also diminishes.

The processes noted resemble the sponge effect described for the first time for sedimentary rocks based on the groundwater level change. In conditions of crystalline rocks, the influence of tidal deformations on the fluid regime of the Earth's crust takes place at the molecular level without any changes in the total content of fluids and all the more without their translation in space to large distances.

The phenomenon detected opens up fresh opportunities for experimental study of the physical state and dynamics of the Earth's crust. In this case, the electromagnetic response of the medium to tidal deformations, determined by the coefficient of tensosensitivity of electrical resistance ( $CTE$ ), can serve as the basic informative parameter:

$$CTE = \frac{\Delta\rho}{\rho} \bigg/ \frac{\Delta H}{H}$$

where  $\Delta H/H$  is the relative compression-extension and  $\Delta\rho/\rho$  is the corresponding relative change of resistance.

The value of  $CTE$  for the Avva-Guba test site from the results of monitoring of tidal deformations was  $2.3 \times 10^5$  rel. u. (relative unit) along the latitudinal component and  $10^5$  rel. u. along the meridional one. The values obtained coincide in their order of magnitude with the average  $CTE$  values established from the measurements of electromagnetic responses from earthquakes with a magnitude of 33.5 at distances of 10-15 km from their epicenters [11].

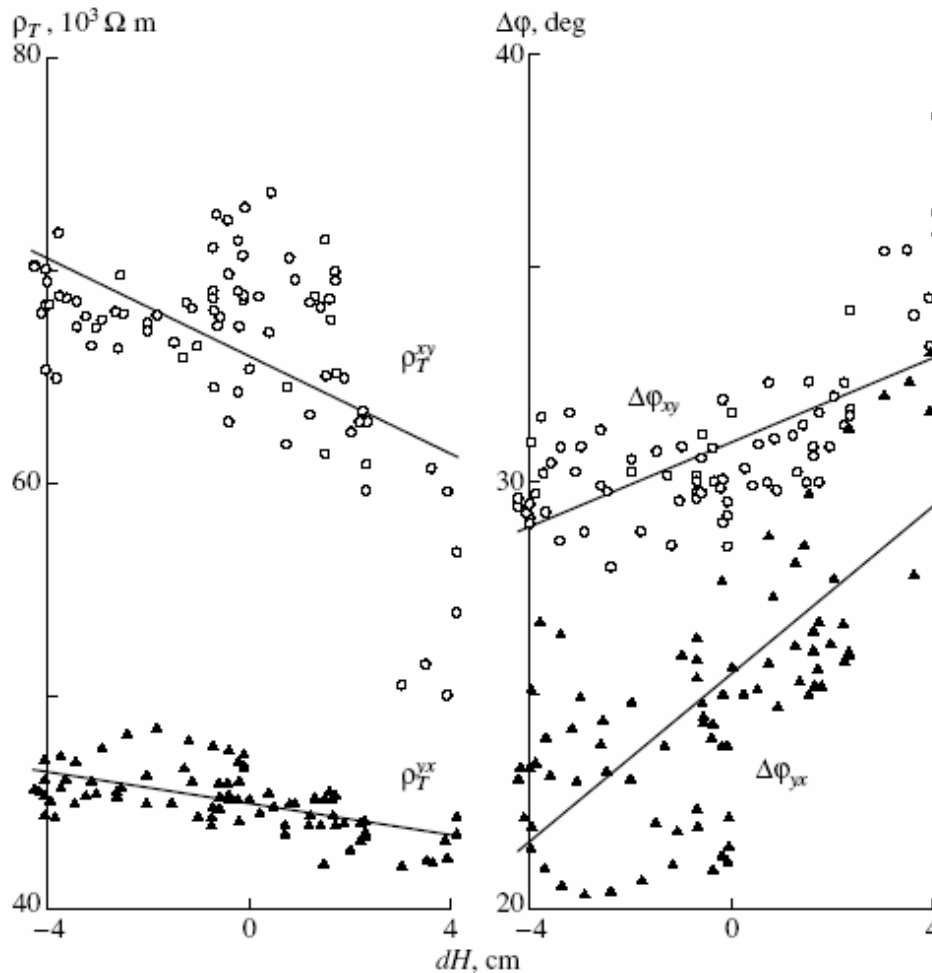


Fig. 4. Diagrams obtained through the processing of data of monitoring at the Avva-Guba point by the leastsquares method. ( $\rho_T^{xy}$  and  $\rho_T^{yx}$ ) resistivities along the latitudinal and meridional components, respectively; ( $\Delta\varphi_{ExHy}$ ,  $\Delta\varphi_{EyHx}$ ) phases of  $Z_{xy}$  and  $Z_{yx}$  impedances, respectively.

Hence, it may be concluded that tides in their energetic are equivalent to medium earthquakes extended in time for 24 h. In this case, tidal deformations themselves can be regarded as peculiar catalysts enhancing the response of rock medium to the electromagnetic disturbance, and thereby allowing us to investigate the Earth's interior structure. The degree of compactness of geodynamic blocks, the character of electrical coupling, and the relative content of fluid components along different tensorsensitive directions and at different depths can be assessed through multicomponent and multifrequency measurements (monitoring) of tidal phenomena in the "Zeus" source field at different geodynamic blocks of the Karelia-Kola region. This in turn will make it possible to solve problems concerning the geological and tectonic evolution of separate blocks of the Earth's crust and provide their metallogenic assessments. Such measurements can substantially assist in the evaluation of petroliferous areas in sedimentary cover.

#### Acknowledgments

The authors are grateful to Yu.M. Kononov and A.V. Mol'kov for technical assistance in the organization of this experiment, as well as to A.K. Saraev for initiative in performing the work and assistance in calculating tidal deformations of the Earth's surface.

This work was supported by the Federal Program "Integratsiya", project no. 326.66.

## References

1. Rikitake, T., Earthquake Prediction, Amsterdam: Elsevier, 1976. Translated under the title *Predskazanie zemletryasenii*, Moscow: Mir, 1979.
  2. Saraev, A.K., Pertel, M.I., and Malkin, Z.M., *Uch. Zap. St. Petersburg Gos. Univ.*, 1998, no. 433, issue 35, pp. 136-147.
  3. Velikhov, E.P., Zhamaletdinov, A.A., Shevtsov, A.N., et al., *Izv. Akad. Nauk, Fiz. Zemli*, 1998, no. 8, pp. 3-22.
  4. Tokarev, A.D., Zhamaletdinov, A.A., and Vasil'ev, A.N., *Pribory i metodika geofizicheskogo eksperimenta (Devices and Methods of Geophysical Experiment)*, Murmansk, 1997, pp. 85-90.
  5. Zhamaletdinov, A.A., *Model' elektroprovodnosti litosfery po rezul'tatam issledovaniy s kontroliruemymi istochnikami polya (Baltiiskii shchit, Russkaya plat-forma) (Model of Electric Conductivity of the Litho-sphere Based on the Study of Controlled Field Sources)*, Leningrad: Nauka, 1990.
  6. Mathews, P.M., Dehaut, V., and Gibson, J.M., *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, pp. 20 469-20 477.
  7. Berdichevskii, M.N. and Dmitriev, V.I., *Magnitotelluricheskie zondirovaniya gorizontally'no-odnorodnykh sred (Magnetotelluric Soundings of Horizontally Homogeneous Media)*, Moscow: Nedra, 1992.
  8. Zhamaletdinov, A.A., Shevtsov, A.N., Tokarev, A.D., Korja, T., and Pedersen, L., *Electromagnetic Induction in the Earth*, Sinaia, 1998, p. 83.
  9. Zhamaletdinov, A.A., Galichanina, L.D., and Kuz-netsov, Yu.I., *Kol'skaya sverkhglubokaya (The Kola Superdeep Borehole)*, Moscow: Nauka, 1998, pp. 156176.
  10. Nur, A., *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1972, vol. 62, pp. 12171222.
  11. Idarmachev, Sh.G. and Abdulaev, Sh.-S.O., *Dokl. Akad. Nauk*, 1998, vol. 361, no. 5, pp. 682-684.
- 
- 

**Сараев А.К., Пертель М.И., Малкин З.М. Опыт изучения приливных вариаций кажущегося сопротивления в аудиочастотном диапазоне // Вопросы геофизики, вып. 39, 2006 - (Ученые записки СПбГУ, № 439). С. 58-68.**

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, aks@AS1002.spb.edu

## Введение

Для контроля напряженно-деформированного состояния геологической среды широко используются измерения удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) горных пород. Это связано с высокой чувствительностью  $\rho$  к структурным особенностям пород, степени их водонасыщения и минерализации воды. При воздействии внешнего давления геологическая среда деформируется, изменяются размеры порового пространства, происходит движение флюида и, как результат, изменяется удельное сопротивление горной породы. Вариации удельного сопротивления горных пород при изменении их напряженно-деформированного состояния являются одним из наиболее чувствительных предвестников землетрясений. Информативность этого предвестника подтверждена многочисленными практическими результатами, полученными как в нашей стране, так и за рубежом.

При использовании методов электрических и электромагнитных зондирований для мониторинга сейсмической активности и прогнозирования землетрясений чаще всего изучается изменение во времени кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ). Вариации  $\rho_k$  обычно наблюдаются в периоды времени от первых месяцев до нескольких лет перед землетрясениями [1,2]. Величины вариаций  $\rho_k$  при этом меняются от первых процентов до 10-20 % [3].

Для электромагнитного мониторинга сейсмической активности целесообразно применять высокоточные методы, обеспечивающие получение надежных данных и достаточно дешевые для создания сетей наблюдений в сейсмоопасных районах. Эти методы должны обладать достаточно большой глубиной для исключения влияний сезонных и метеорологических факторов.

Метод аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ) в настоящее время отвечает этим требованиям. Строгая и хорошо разработанная теория метода, основанная на использовании плоской вертикально падающей волны в качестве модели первичного поля, обеспечивает надежную интерпретацию получаемых данных.

Ранее метод АМТЗ не применялся широко для мониторинга сейсмической активности. Это было связано с невысокой точностью метода из-за нестабильности и низкой интенсивности естественных электромагнитных полей аудиочастотного диапазона и существенного влияния промышленных помех. В последние годы точность метода АМТЗ существенно возросла. Современная аппаратура АМТЗ в благоприятной помеховой обстановке позволяет получать данные хорошего качества, пригодные для использования при мониторинге сейсмической активности.

Достигнутая высокая точность метода АМТЗ позволяет регистрировать небольшие вариации кажущегося сопротивления, отражающие изменения напряженно-деформированного состояния горных пород из-за приливных деформаций земной коры. Изучение приливных вариаций  $\rho_k$  может быть использовано для

моделирования сейсмоэлектромагнитных явлений перед землетрясениями. Воспроизводимые данные об изменении  $\rho$  горных в естественных условиях перед сейсмическими событиями получить не удастся. Вместе с тем, изменения напряженно-деформированного состояния горных пород под воздействием земных приливов и при подготовке землетрясений похожи, и наблюдения приливных вариаций позволяет установить закономерности поведения этого предвестника. При этом подходе к моделированию процессов подготовки землетрясений изучаются большие объемы горных пород в условиях естественного залегания, и имеется возможность проводить повторяющиеся эксперименты.

Результаты таких наблюдений могут быть использованы для изучения закономерностей вариаций  $\rho_k$  перед землетрясениями, для выбора тензочувствительных зон при установке измерительной аппаратуры, для определения оптимальных частот и мониторинга за наиболее чувствительными интервалами геоэлектрического разреза, а также для учета приливных эффектов, как мешающих факторов при мониторинге сейсмической активности.

В настоящее время также имеется необходимость учета приливных эффектов при проведении работ методом АМТЗ для изучения геоэлектрических разрезов и решения геологических задач. Ранее приливные эффекты не учитывались из-за невысокой точности измерений.

В предыдущие годы приливные вариации  $\rho_k$  наблюдались при измерениях методами электромагнитных зондирований с искусственными источниками [3,4,5]. Было установлено, что суточные изменения  $\rho_k$ , связанные с приливами, составляют 4-10 %. Эксперименты с российской СНЧ- радиустановкой «Зевс» [6,7] позволили зарегистрировать наличие приливных вариаций  $\rho_k$  величиной 7-15 %.

В настоящей статье рассматривается опыт изучения приливных вариаций кажущегося сопротивления по результатам измерений естественных электромагнитных полей.

### Приливные деформации земной коры

Гравитационное воздействие Луны и Солнца приводит к деформациям Земли и изменениям напряженного состояния горных пород. Приливные силы имеют максимальную амплитуду на земной поверхности, уменьшаются с глубиной и в центре Земли исчезают. Наибольшие приливные деформации характерны для вертикальной составляющей  $dH$ . В направлениях С-Ю ( $dN$ ) и З-В ( $dE$ ) приливные деформации имеют меньшие величины. Деформация  $dH$  меняется от максимума до минимума на 12 см вблизи полюсов Земли и на 55 см около экватора. Деформации  $dN$  и  $dE$  меняются на 12 см во всех широтах. Наибольшее приливное воздействие на Землю производится Луной; амплитуда солнечного воздействия примерно в два раза меньше.

Приливные деформации содержат ряд гармоник с различным периодом и амплитудой. Их спектральный состав показан на рис. 1. Наибольшей амплитудой характеризуется главная лунная полусуточная волна M2 с периодом 12.42 часа. Вторая по величине волна K1 с периодом 23.93 часа (звездные сутки) связана с одновременным влиянием Луны и Солнца. Волна S2 с периодом 12 часов является главной солнечной полусуточной волной (связана с вращением Земли около ее оси). Волна O1 с периодом 25.82 часа является главной лунной суточной волной.

Одновременное воздействие Луны и Солнца и их изменяющееся взаимное расположение приводит к сложной картине приливных деформаций. Величины и закономерности изменений деформаций в течение дня, месяца и года существенно меняется. При анализе этих особенностей можно выделить случаи сизигий (Солнце, Луна и Земля расположены на одной прямой) и квадратур (при наблюдении с Земли положения Луны и Солнца образуют угол 90 град.). Минимальные приливные деформации наблюдаются в периоды квадратур, а максимальные – сизигий (рис. 2а,б). Положения сизигий и квадратур определяются вращением Луны вокруг Земли и повторяются дважды в месяц, т.е. в течение месяца наблюдаются две сизигии и две квадратуры (рис. 2в). Амплитуда приливных деформаций также зависит от изменения расстояния между Землей и Луной: в апогее это расстояние равно 406 000 км, а в перигее – 354 000 км. Кроме полусуточной и полумесячной периодичности наблюдается полугодовая периодичность, связанная с вращением Земли вокруг Солнца (рис. 2г).

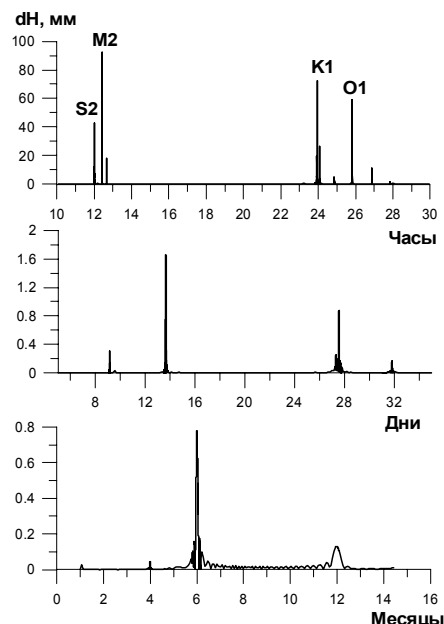


Рис. 1. Гармоники вертикальной приливной деформации для часовых, дневных и месячных периодов.

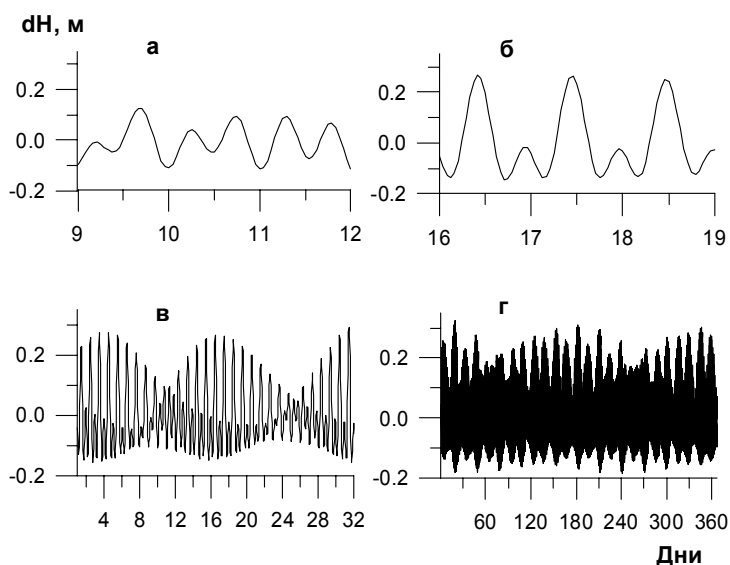


Рис. 2. Особенности поведения вертикальной составляющей приливных деформаций  $dH$  для положений Луны и Солнца в квадратуре (а) и сизигии (б), а также месячные (в) и годовые (г) изменения  $dH$ .

использовалась четырехканальная (тензорная) аппаратура АКФ. Последняя модификация данной аппаратуры – прибор АКФ-4М [8] включает цифровой измерительный блок с каналом связи Ethernet с персональным компьютером и четыре 24-битные канала для синхронных измерений сигналов электрического ( $E_x, E_y$ ) и магнитного ( $H_x, H_y$ ) полей. Диапазон рабочих частот 0.1-800 Гц. Объем встроенной памяти составляет 512 Мб. Измерения проводятся в режимах регистрации временных рядов и спектрограмм. Реализованы тензорные измерения, программный контроль работы аппаратуры, цифровая обработка сигналов, вычисление и визуализация спектральных характеристик измеряемых сигналов. Аппаратура АКФ-4М обеспечивает высокую точность измерений (1% по кажущемуся сопротивлению и 0.5 град. по фазе импеданса).

### Анализ и обсуждение результатов

Эксперименты по мониторингу и изучению вариаций кажущегося сопротивления были выполнены в различных регионах России и в Кыргызстане. При проведении работ приливные вариации наблюдались в неоднородных геологических средах и не отмечаются в однородных.

Для участка в районе г. Красноярск разрез представлен водонасыщенными песками и глинами в верхней части и породами фундамента (гранитами) на глубине 240 м. Кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса ( $\varphi_{z1}, \varphi_{z2}$ ) для двух главных направлений тензора импеданса в этой точке показаны на рис. 3.

Значения  $\rho_k$  в точке зондирования меняются в пределах от 20 до 100 Ом·м. Для низких частот характерны низкие значения фазы импеданса, что связано с высоким удельным сопротивлением пород фундамента (более 10 000 Ом·м). Анализ поведения амплитудных и фазовых кривых показывает, что они заметно различаются как на высоких, так и на низких частотах, причем как амплитудные, так и фазовые кривые пересекаются между собою. Различия амплитудных кривых на высоких частотах и фазовых кривых на низких свидетельствуют о существенной неоднородности как верхней, так и более глубокой частей разреза.

По результатам мониторинга, выполненного 29-30.07.1996 г., установлена обратная корреляция графиков вертикальной составляющей приливной деформации  $dH$  и кажущихся сопротивлений  $\rho_{k1}$  и  $\rho_{k2}$ . На рис. 4 приведены графики изменений значений  $\rho_{k1}$  и  $\rho_{k2}$  от мирового времени UT (Universal Time) для частоты 130 Гц. Такой же характер зависимости отмечается и для других частот из диапазона 6-200 Гц. При подъеме земной поверхности

Рассмотренные закономерности приливных деформаций следует учитывать при планировании работ по мониторингу и интерпретации полученных данных, т.к. в различные периоды времени можно ожидать приливных вариаций кажущегося сопротивления различной амплитуды.

### Метод АМТЗ и используемая аппаратура

Метод АМТЗ основан на использовании естественных электромагнитных полей звукового (аудио) диапазона частот от первых герц до первых килогерц. При помощи аппаратуры АМТЗ измеряются сигналы горизонтальных и взаимно ортогональных составляющих электрического и магнитного полей и определяются амплитуда поверхностного импеданса (кажущегося сопротивления  $\rho_k$ ) и фаза импеданса  $\varphi_z$ . При интерпретации по амплитудным и фазовым кривым АМТЗ получают геоэлектрический разрез до глубины 1-2 км.

В наших экспериментах

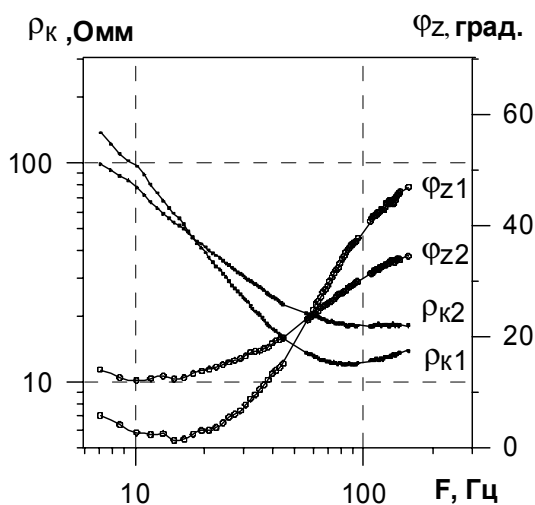


Рис. 3. Кривые АМТЗ на участке в районе г. Красноярск.

происходит уменьшение значений как  $\rho_{k1}$ , так и  $\rho_{k2}$ . Величина вариаций  $\rho_k$  составляет около 8 % при изменении  $dH$  на 30 см.

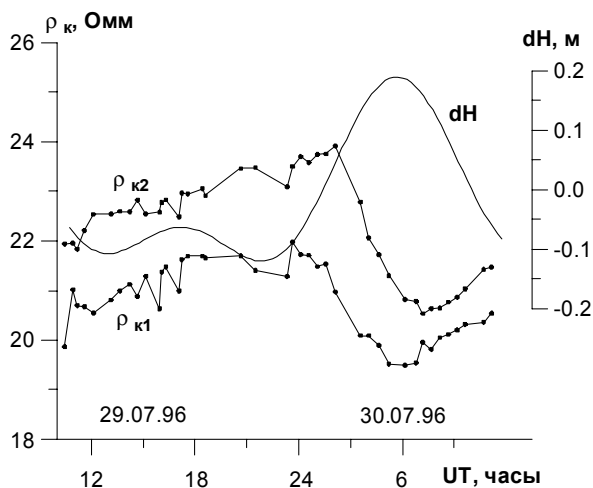


Рис. 4. Результаты мониторинга для частоты 130 Гц на участке в районе г. Красноярск.

амплитудных и фазовых кривых свидетельствует (как и для рассмотренного выше участка в районе г. Красноярск) о заметной неоднородности как верхней, так и более глубокой частей разреза.

По результатам мониторинга, выполненного 04.06.2005 г. на участке Таш Башат на частоте 7 Гц, установлена прямая корреляция графиков приливной деформации  $dH$  и кажущихся сопротивлений  $\rho_{k1}$  и  $\rho_{k2}$  (рис. 6). Аналогичный характер зависимостей для  $\rho_{k1}$  и  $\rho_{k2}$  наблюдается и на более высоких частотах до 200 Гц. Величина вариаций составляет 2-3 % при изменениях  $dH$  до 30 см. В интервалах 12:00 -14:00 мирового времени или 17:00 – 19:00 местного времени наблюдаются некоторые различия поведения графиков  $dH$  и  $\rho_k$  (на 1-2 %). Причины этих различий предполагается установить в дальнейшем.

Различный характер зависимости между графиками  $\rho_k$  и  $dH$  в Красноярском и Бишкекском регионах может быть объяснен различной степенью водонасыщения горных пород. Когда вода полностью заполняет поровое пространство, горная порода имеет низкое удельное сопротивление. Сжатие среды (при понижении поверхности Земли в случае отлива) приводит к пережиму проводящих водонасыщенных каналов и удельное сопротивление породы возрастает. Снижение давления (при подъеме поверхности Земли в случае прилива) приводит к уменьшению удельного сопротивления породы. В этом случае мы наблюдаем обратную корреляцию графиков  $\rho_k$  и  $dH$  (рис. 4).

При низком содержании воды горная порода имеет высокое удельное сопротивление. В этом случае распределение воды в породе носит разобщенный характер. При сжатии среды вода из участков ее концентрации проникает в поры и мелкие трещины, формируя сеть взаимосвязанных каналов, и удельное сопротивление породы уменьшается. При снижении давления вода уходит из пор и трещин и ее распределение в породе становится менее связанным, что приводит к увеличению удельного сопротивления. В данном случае наблюдается так называемый «эффект губки» [9]. При мониторинге мы наблюдаем прямую корреляцию графиков  $\rho_k$  и  $dH$  (рис. 6). Подобные зависимости были ранее получены в лабораторных экспериментах с водонасыщенными и сухими образцами горных пород [10].

Более сложный характер зависимости был получен нами при мониторинге на участке с анизотропными породами. Вуоксинский массив гранодиоритов (Карельский перешеек) расположен среди метаморфических

Данные о приливных деформациях земной коры в этом и других рассматриваемых экспериментах получены расчетным путем. При расчетах имеется возможность получения некоторых усредненных значений приливных деформаций, которые могут отличаться по величине от реальных в точке измерений. Однако, сдвига по фазе с реальными деформациями не происходит, и мы можем использовать расчетные значения для сравнения с данными АМТЗ.

На участке Таш Башат в районе г. Бишкек (Кыргызстан) разрез представлен гранодиоритами на глубине около 10 м и перекрывающимися осадочными отложениями. По данным АМТЗ установлено, что значения  $\rho_k$  на этом участке меняются от 200 до 600 Ом·м (рис. 5а). Кривые кажущегося сопротивления для направлений приемной линии электрического поля MN 0 град. ( $\rho_{k2}$ ) и 90 град. ( $\rho_{k1}$ ) различаются примерно в два раза на высоких частотах и пересекаются на низких. Фазовые кривые  $\varphi_{z2}$  и  $\varphi_{z1}$  на высоких частотах сближаются, а на низких расходятся. Такие особенности

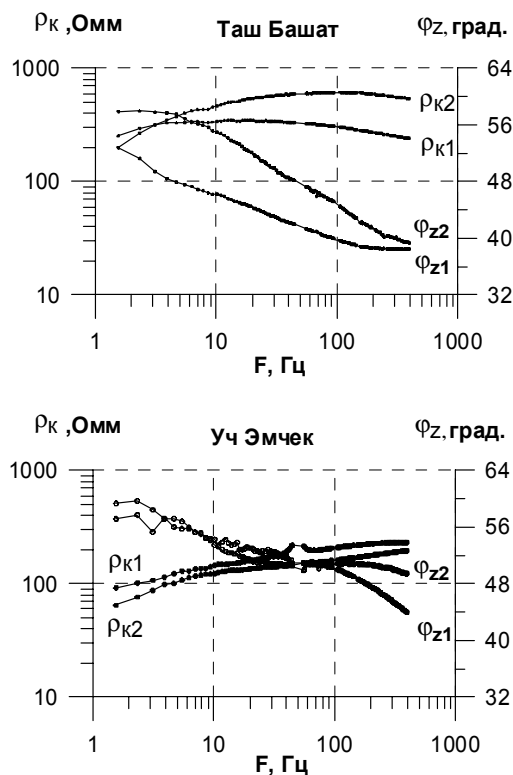


Рис. 5. Кривые АМТЗ на участках Таш Башат и Уч Эмчек в районе г. Бишкек.

пород (гнейсы, кристаллические сланцы). По данным бурения установлено, что гранодиориты перекрыты осадочными породами мощностью до 30-40 м. В верхней части гранодиоритов выделяется выветрелая зона мощностью от 10 до 40 м.

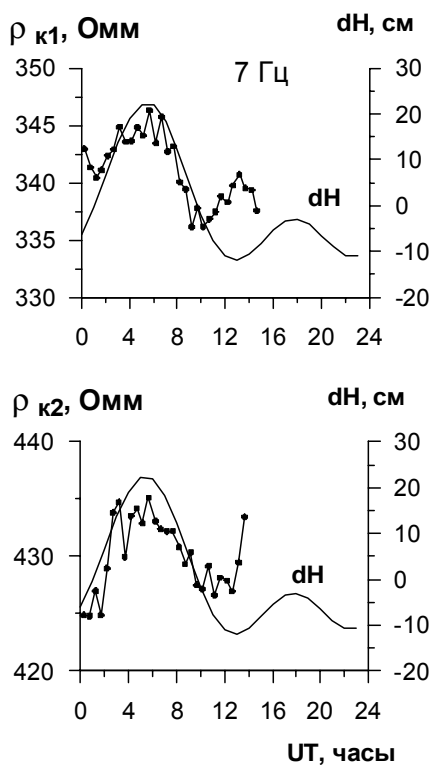


Рис. 6. Результаты мониторинга на участке Таш Башат.

не отмечено. Это можно объяснить пониженной глубиной  $\rho_{к2}$  при повышенной частоте поля, и связью  $\rho_{к2}$  в этом случае с перекрывающимися однородными водонасыщенными отложениями, для которых приливных вариаций кажущегося сопротивления не наблюдается.

Отсутствие приливных вариаций  $\rho_{к}$  для однородных водонасыщенных осадочных пород иллюстрируется данными мониторинга на участке Уч Эмчек (Бишкекский регион). На этом участке разрез сложен мощными (сотни метров) осадочными отложениями с пониженными значениями удельного сопротивления (по результатам АМТЗ до 200 Ом·м). Кривые  $\rho_{к}$  и  $\varphi_z$  для направлений MN 0 град. и 90 град. близки между собою (рис. 5б), что свидетельствует об однородности геологической среды.

Данные мониторинга выполненного 27.05.2005 г. на участке Уч Эмчек для частот 7, 70 и 175 Гц в сравнении с результатами мониторинга выполненного 04.06.2005 г. на участке Таш Башат для тех же частот приведены на рис. 9.

На участке Таш Башат с высокой тензочувствительностью при изменениях  $dH$  на 30 см наблюдаются заметные вариации  $\rho_{к2}$  (для азимута MN 0 град.) на трех частотах, в то время как на участке Уч Эмчек с низкой тензочувствительностью при изменениях  $dH$  на 35 см значения  $\rho_{к2}$  не меняются в течение дня. Аналогичные закономерности отмечены на этих участках для  $\rho_{к1}$  (при азимуте MN 90 град.).

Приведенные на рис. 9 данные мониторинга иллюстрируют высокую точность измерений кажущегося сопротивления (не хуже 1 %) и возможность контроля небольших (2-3 %) изменений кажущегося сопротивления. Это позволяет сделать вывод о возможности применения метода АМТЗ с использованием современной аппаратуры для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород и прогнозирования землетрясений.

Кривые кажущегося сопротивления ( $\rho_{к1}$ ,  $\rho_{к2}$ ) и фазы импеданса ( $\varphi_{z1}$  и  $\varphi_{z2}$ ) для главных направлений тензора импеданса для одного из участков Вуоксинского массива показаны на рис. 7. Минимальная кривая  $\rho_{к1}$  (случай Е-поляризации) соответствует азимутам приемной линии электрического поля MN 80-90 град., что совпадает с простиранием геологических структур (главных разломов, анизотропии пород) на данном участке. Максимальная кривая  $\rho_{к2}$  (случай Н-поляризации) соответствует азимутам MN 350-10 град. и направлению вкрест простиранию геологических структур участка. Неоднородность среды в горизонтальном направлении и влияние анизотропии пород подтверждается смещением кривых  $\rho_{к1}$  и  $\rho_{к2}$  друг относительно друга с отличием значений кажущегося сопротивления примерно в два раза.

Результаты мониторинга на данном участке, выполненного 26.07.1998 г., представляющего графики изменений во времени значений  $\rho_{к1}$  и  $\rho_{к2}$  для частот 70, 90 и 130 Гц в сравнении с графиком  $dH$ , показаны на рис. 8. Максимальное значение  $dH$  при этом составляет 15 см.

Анализ поведения графиков  $\rho_{к1}$  и  $\rho_{к2}$  показывает, что наиболее заметные приливные вариации (величиной около 5%) наблюдаются на частотах 70, 90 и 130 Гц для минимальных значений  $\rho_{к1}$ . При этом отмечается обратная корреляция графиков  $\rho_{к1}$  и  $dH$  (подъему земной поверхности отвечает уменьшение кажущегося сопротивления).

Для максимальных значений кажущегося сопротивления на частотах 70 и 90 Гц наблюдается прямая корреляция графиков  $\rho_{к2}$  и  $dH$  (подъему земной поверхности отвечает увеличение кажущегося сопротивления). Для частоты 130 Гц взаимосвязи графиков  $\rho_{к2}$  и  $dH$

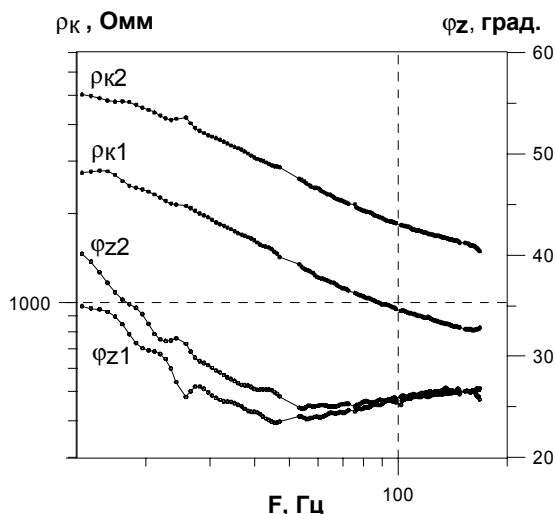


Рис. 7. Кривые АМТЗ на участке на Карельском перешейке.

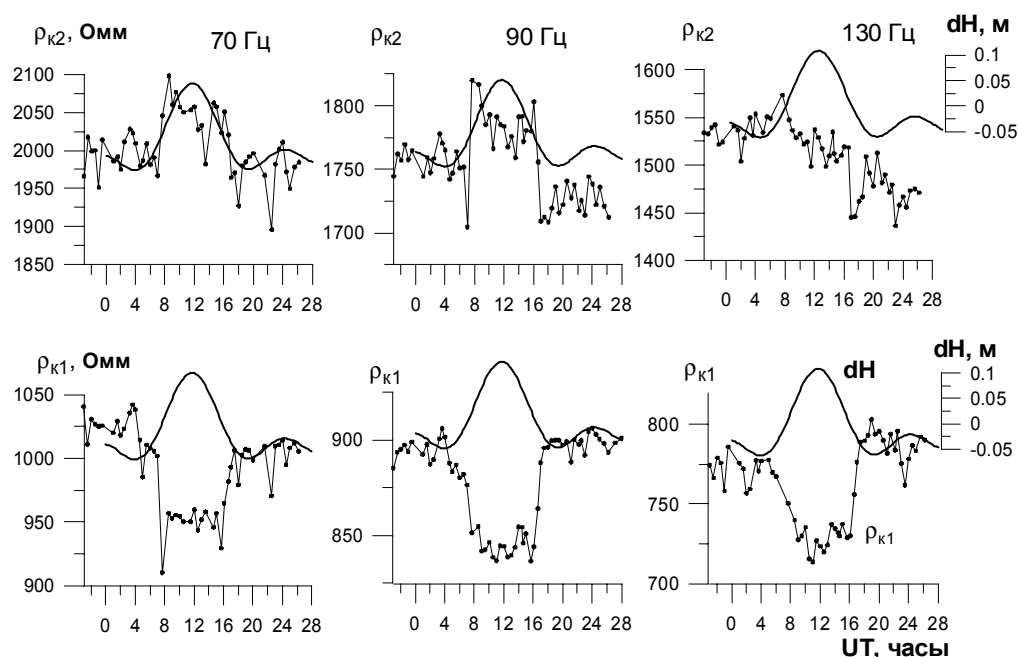


Рис. 8. Результаты мониторинга на участке на Карельском перешейке

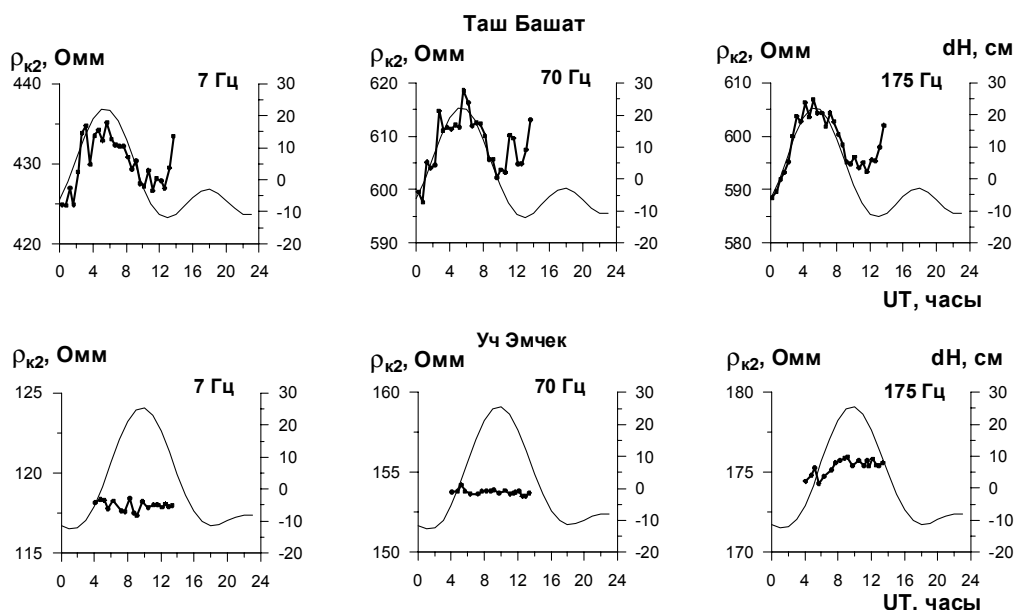


Рис. 9. Результаты мониторинга на участках Таш Башат и Уч Эмчек в районе г. Бишкек.

### Выводы

1. Измерения естественного электромагнитного поля в аудиочастотном диапазоне позволили установить наличие корреляции между вариациями кажущегося сопротивления и приливыми деформациями земной коры. Вариации  $\rho_k$  с амплитудой до 3-8% связаны с вертикальными приливыми деформациями  $dH$  с амплитудой 15-30 см.

2. Приливные вариации кажущегося сопротивления наблюдаются в неоднородных геологических средах. На участках с мощными однородными осадочными породами в верхней части разреза заметных приливных вариаций  $\rho_k$  не отмечено.

3. По результатам наблюдений были получены как прямая, так и обратная корреляции между графиками  $\rho_k$  и  $dH$ . Различный характер приливных вариаций  $\rho_k$  объясняется различной степенью водонасыщенности пород. Прямая корреляция графиков  $\rho_k$  и  $dH$  наблюдалась в сухих породах с высоким удельным сопротивлением, а обратная корреляция - в водонасыщенных породах с низким удельным сопротивлением.



4. По результатам мониторинга на участке с анизотропными породами установлен различный характер корреляции  $\rho_k$  и  $dH$  для случаев различной поляризации: прямая корреляция для  $H$ -поляризации, и обратная – для  $E$ -поляризации. Более заметные изменения  $\rho_k$  характерны для  $E$  поляризованного поля.

5. Высокая точность измерений кажущегося сопротивления (не хуже 1%) с использованием современной аппаратуры АМТЗ позволяет регистрировать небольшие (2-3%) вариации кажущегося сопротивления. Поэтому метод АМТЗ может использоваться для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород и прогнозирования землетрясений.

Работа выполнена при поддержке проекта МНТЦ Кг-583.

#### Список литературы

1. Барсуков О.М., Сорокин О.Н. Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // Физика Земли. 1973. № 10. С. 100-102.
  2. Lu J., Qian F., Zhao Y., (1999). Sensitivity analysis of the Schlumberger monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China. Tectonophysics 307, 397-405
  3. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
  4. Альтгаузен Н.М., Барсуков О.М. О временных вариациях электропроводности // Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука, 1970. С. 104-110.
  5. Авагимов А.А., Атаев А.И., Атаев С.А. 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.
  6. Сараев А.К., Пертель М.И., Малкин З.М. Проявление деформаций земной коры, вызванных приливами, в изменениях импеданса электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Вопросы геофизики. Выпуск 35. СПб., 1998 – (Ученые записки СПбГУ: № 433).
  7. Кононов Ю.М., Жамалетдинов А.А. Системы СНЧ-радиосвязи и мониторинга среды: перспективное направление конверсионной политики России. Радиоэлектроника и телекоммуникации, 3 (21), 2002. С. 4-6.
  8. Сараев А.К., Головенко В.Б., Ларионов К.А., Смирнова Т.Е. Аппаратура аудиоманнитотеллурического зондирования АКФ-4М // Индустрия, 3 (33), 110, 2003. С. 110-111.
  9. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
  10. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.
- 
-

## Глава 4. Методика и техника возбуждения и регистрации СНЧ электромагнитного поля.

*Velikhov E.P.<sup>1</sup>, Zhamaletdinov A.A.<sup>2</sup>, Shevtsov A.N.<sup>2</sup>, Tokarev A.D.<sup>2</sup>, Kononov Yu.M.<sup>3</sup>, Pesin L.B.<sup>3</sup>, Kadyshevich G.M.<sup>3</sup>, Pertel' M.I.<sup>4</sup>, Veshchev A.V.<sup>4</sup>* (1998) **Deep Electromagnetic Studies with the Use of Powerful ELF Radio Installations.** // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, Vol. 34, No. 8, 1998, pp. 615-632. Translated from *Fizika Zemli*, No. 8, 1998, pp. 3-22.

<sup>1</sup>Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Geological Institute of the Kola Research Center, Russian Academy of Sciences, Apatity

<sup>3</sup>Communication Department of the Russian Navy

<sup>4</sup>Research Institute of the Earth's Crust, St. Petersburg

**Abstract** - An overview of current deep studies with the use of a new type of electromagnetic source in the extremely low frequency (ELF) range is presented. The results of the experimental explorations with the "Zeus" ELF installation located in the north of the Kola Peninsula are reported. The soundings in the near-field zone, DC soundings, soundings in the frequency and transient-field regimes in ore regions, and deep soundings in the wave zone, at a distance of up to 1100 km, are described. The influence of the ionosphere and displacement currents on the results of deep soundings was analyzed. The possible use of the "Zeus" ELF radio installation in applied and basic geophysics is discussed.

### Introduction

This paper is devoted to the analysis of possibilities to use a new type of controlled source - a powerful radio transmitting installation of extremely low frequency (ELF) range-in deep electromagnetic studies. Before describing the installation and the initial results, it is appropriate to review previous studies in this direction.

The history of electromagnetic soundings of the Earth using powerful controlled sources began in the mid-1940s, when the first deep soundings were carried out in the Gulf of Finland [Kraev et al., 1947]. The soundings used a grounded electric line submerged in the sea and fed by a direct (pulse) current. The power installation composed of a battery of lead-acid cells provided a current of up to a thousand amperes in the line. The observations were conducted along the ground and sea lines and used an analog-type measuring apparatus. These works, with a separation of up to 75 km, showed that a conductive layer exists in the crust, at depths of 10 to 20 km. Around the same time, geoelectric measurements were performed in Sweden, with the use of grounded electric lines of up to 200 km in length, with the purpose of studying the influence of ground currents on underground service lines [Lundholm, 1946]. From these works, it was proposed that the electrical conductivity of the crust, at a depth of about 30 km, increases.

The results of soundings in the Gulf of Finland lent impetus to the further development of deep soundings in the USSR, which were based mainly on the magnetotelluric method developed by A.N. Tikhonov [1950] and L. Cagniard [1953]. Along with this, the technique of soundings with controlled sources continued to improve. Of the most important results, we note a series of deep dc soundings carried out in the United States and Canada in 1963-1968, with the use of mobile sources and sections of power lines [Cantwell et al., 1965; Samson, 1969]. The studies were made in connection with the choice of the territory for installation of antennas for the underground and land-based low-frequency wireless communication that could be used to detect electromagnetic signals from distant nuclear explosions, to perform the communication with submerged objects, and to solve other tasks. The working separations reached 200 km for the line length from 37 to 218 km.

The studies in the Dallas area [Cantwell et al., 1965] indicated a strong inhomogeneity of the underlying basement. The average resistivity of the basement in the eastern sector of the examinations reached 20000  $\Omega\cdot\text{m}$ , whereas in the southern sector, at a distance of about 200 km, the resistivity was only 10  $\Omega\cdot\text{m}$ . According to the quoted authors, the cause of such great variations in the crustal resistivity at depth is related to the possible effect of a E-W-oriented deep-seated fault. From data of various authors, the depth to the conductive layer in the crust ranges from 70 km in North America [Cantwell et al., 1965] to 10 km in Canada [Samson, 1969].

These and other results suggested an abrupt electrical inhomogeneity in the Earth's deep structure. This, in turn, led to the abandonment of possible distant underground wireless communication with the use of low-frequency electromagnetic waves, which propagate over hundreds and even thousands of kilometers in the poorly conductive middle crust. In this case, the latter might serve as an unusual waveguide between two highly conductive shells: the fluid-containing upper crust with a thickness of 5-10 km and the high-temperature conductive lower crust at depths of 40-50 km.

During 1965-1976, a wide program of deep soundings was performed in southern Africa [Van Zijl, 1969; Van Zijl and Jubert, 1975; Blohm et al., 1977]. The DC soundings were carried out using the dominantly four-electrode Schlumberger array. The Cabora-Bassa high voltage 1250-km-long DC line and telephone lines were used during the period that it was made operational. The maximum AB/2 separations reached 620 km. The results of these many-year studies were generalized by Van Zijl and Jubert [1975]. Unlike the results for North America, they concluded that the

crustal conductive layer exists throughout the southern African crystalline shield, at depths of 10-20 km. The nature of the conductive layer was related to the dehydration of the rocks.

A number of deep soundings were also carried out in Central Europe (in France), with the use of DC sources [Migaux et al., 1960] and the earth current of electrified railroads [Mennier, 1969]. The high electrical conductivity of the sedimentary cover and the restricted separations (a few tens of kilometers) in these experiments did not allow the study of the lower crust structure.

In the early 1970s, the technique of soundings with controlled sources was supplemented by a pulse magnetohydrodynamic (MHD) generator with a power of up to 80 MW. A series of experiments was carried out in the Urals, Pamir, and the Kola Peninsula [Astrakhantsev et al., 1977; Velikhov and Volkov, 1982; Velikhov et al., 1984; Zhamaletdinov, 1982]. The results of the Ural MHD experiment conducted on a restricted network of profiles were found to be affected by a thick conductive fault. Consequently, in spite of the great depth of these studies, up to 40 km, only ambiguous results for the electrical model of the crust in this region were obtained. The experiment with the Khibiny MHD source on the Kola Peninsula used areal measurements and a network of regional profiles covering northern Karelia and adjacent parts of Finland and Norway, along with the Kola Peninsula. The observations were used to develop a block model for electrical conductivity in the upper crust and to identify homogeneous poorly conductive basement blocks, on which the measuring sites were then concentrated. These studies were intended for the deep sounding of the lithosphere through its total thickness. The current in the antenna (flooded circuit) reached 22000 A. The measurements were made at distances of up to 600-700 km from the source.

These studies allowed the assessment of the character of variations in the crustal electrical conductivity to depths of 100-150 km in a frequency range of 0.05- 2 Hz and gave an overall estimate of the transverse resistivity of the crust  $T = h \cdot \rho$  ( $R$  is the thickness and  $\rho$  is the resistivity of poorly conductive crust) reaching  $2 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{m}^2$  [Zhamaletdinov, 1982, 1990]. Such a high transverse resistivity was confirmed in the order of magnitude by the model calculations [Vanyan et al., 1989] and suggested the absence of conductive layers in the crust, at least, to a depth of 30-40 km. However, this conclusion is at variance with the majority of the previous results derived from deep soundings with powerful controlled sources and magnetotelluric (MT) and audiomagnetotelluric (AMT) soundings [Jones, 1982; Kovtun et al., 1986].

During approximately the same years, deep sounding experiments began in the Soviet Union with the use of industrial power lines. Glaze-melting installations [Sapuzhak and Enenstein, 1980] and DC power lines [Zhamaletdinov et al., 1981, 1990] were employed as current sources. In the experiments with the Volgograd-Donbass 800 kV DC power line, 473 km long, the current reached 1400 A in the doubling regime. However, in spite of the large achieved separations (up to 504 km), the curve of apparent resistivity from the distant sounding did not exceed the bounds of the ascending asymptote, which suggested the absence of conductive layers in the crust, at least, up to a depth of 2030 km and the presence of a high transverse resistivity of the crust (on the order of  $10^{10} \Omega \cdot \text{m}^2$ ), which impedes the penetration of current to large depths.

Thus, the analysis of the deep soundings presented above shows that the basic problem on the electrical conductivity model for the crust has not yet been resolved, since the results obtained by various researchers with the use of different methods are at great variance. Further searches for unambiguous solutions must lie in the manner that alternative methods of deep electromagnetic soundings are applied.

A new step in the technique of Earth soundings is related to the application of ELF radio transmitting antennas. The first experiments in this direction were carried out in 1990-1993 [Velikhov et al., 1994]. Studies on the development and creation of the ELF antennas and on the propagation and detection of low-frequency electromagnetic oscillations in the Earth-ionosphere waveguide began in the Soviet Union and the United States in the mid-1960s. The purpose of these works was to solve the problems of wireless communication with submerged objects and of the detection of underground nuclear explosions [Ames et al., 1963; Keller et al., 1966; Bernstein et al., 1974]. The attractiveness of using extremely long radio waves for these purposes is related to the following unique features of the ELF range.

(1) The ELF waves propagating in the Earth-ionosphere waveguide penetrate sufficiently deeply into the waveguide walls. For a frequency of 100 Hz and lower, the maximum depth reaches 100 m in the ocean and 10-15 km in crystalline shields.

(2) The properties of the waveguide are such that the attenuation of ELF waves, inferred from experimental data, decreases as the frequency decreases, from 1020 dB/1000 km for a frequency of 1 kHz to 12 dB/1000 km for a frequency of 100 Hz. This provides virtually global communication with remote objects for a fixed transmitter position.

(3) Due to their great length, the parameters of ELF wave propagation minimally depend on the ionosphere disturbances. This provides a higher stability of communication compared to high-frequency transmitters.

### 1. Methods of ELF wave radiation

An important feature placing specific constraints on the design of ELF antennas is their small linear dimensions compared to the wavelength in air, which leads to problems regarding their high reactive impedance. In the vertical antenna, while generating the ELF waves, electrical break-down occurs before the necessary current is reached. Consequently, an optimum vibrator for the ELF radiation is a horizontal line grounded on its both ends. The principal requirements to such an antenna are a sufficiently large electric moment  $P = J \cdot l$  (where  $J$  is the current in the antenna and  $l$  is the antenna length) and a sufficiently low conductivity in the underlying half-space. The latter requirement is

caused by the necessity to obtain the maximal radiating magnetic moment. The grounding of the antenna ends provides a path for the returning earth current. The current is concentrated at a depth approximately equal to  $\delta/\sqrt{2}$ , where  $\delta \approx \sqrt{2\rho/\omega\mu_0}$  is the skin thickness in the Earth. At distances exceeding  $3\delta$ , the field of the horizontal grounded cable can be represented by a vertical magnetic loop with an area of  $L\delta/\sqrt{2}$ .

The generator power required to produce the necessary magnetic moment of the antenna is determined by the total complex resistivity at the antenna input. The active component is created by the resistance of the grounding systems, the lead, and the returning path of the earth current. The earth current resistance  $R_e$  is produced by the Foucault currents in the Earth. The value of  $R_e$  is usually estimated assuming that the earth current flows in a half-cylindrical hollow provided that  $l > \delta$ ; in this case,  $R_e = \omega\mu_0/8$  [Bernstain et al., 1974].

The grounding systems are a special problem in the design of the ELF antennas. The requirement of the minimum conductivity of the ground beneath the antenna leads to the necessity of using the ground connections occupying large areas in order to diminish their resistivity. The grounding resistivity  $R$  is estimated to an accuracy sufficient for practice by the formula  $R = \rho/l$  for a linear grounding with length  $l$  and by the formula  $R = \rho/P$  for a plane grounding, where  $P$  is the grounding perimeter (in m). Hence, one can see that, for the average resistivity of the ground  $\rho=10^4\Omega\cdot\text{m}$ , the transient grounding resistance on the order of 2-3 $\Omega$  is provided by a grounding with an area of no less than 1 km<sup>2</sup>.

The reactive impedance is the sum of the inductive and capacitive components. For the end-grounded feeder, the effect of a distributed capacitance is similar to that of a resistor placed in parallel with the grounding resistor. In this case, the wire will be under the same potential, and for a low grounding resistance, the influence of the capacitive reactance can be neglected. Consequently, the wire inductance makes the main contribution to the reactive impedance of the ELF antenna. Inductive reactance  $R_L$  reflects the accumulation of energy in the magnetic field and is proportional to the field frequency

$$R_L = \omega L, \Omega,$$

where  $L$  is the running inductance of the wire lying on the ground. In practical calculations,  $L$  is set as  $3 \cdot 10^{-3}$  H/km [Veshev, 1980]. For a frequency of 100 Hz, the inductive reactance of the 100-km-long antenna is approximately 180 $\Omega$ . In order to achieve a purely resistive load on the circuit, the matching capacities are introduced in a series connection to the line so as to form a series resonance  $RLC$  circuit. The further matching of the circuit is made by adjusting the circuit quality factor.

## 2. Experiments with the ELF transmitters

At the present time, two projects that practically realized the ELF communication are known: "Sangwin" (United States) and "Zeus" (Russia). In the course of the realization of the "Sangwin" project, a few transmitting antennas were first constructed [Bernstain et al., 1974; Bannister, 1974]. One of them was installed in North Carolina in 1966-1967. A 176-km-long horizontal wire served as the transmitting antenna and was fed by a current on frequencies of 78 Hz, 156 Hz, etc. The observations were performed along a 4900-km trace (up to Iceland).

Another series of observations was conducted in the state of Wisconsin in 1971-1973 (United States). The transmitting VIU antenna was composed of two orthogonal grounded lines, each of which had an individual power supply at the central point, in a frequency range of 45 to 75 Hz. Each of the antennas was 22.5 km long, and the maximum current was 300 A. The directivity diagram of the antenna could be controlled by choosing the phase difference between the currents in two vibrators, which provided the omnidirectional pattern. The location of the VIU antenna and the sites of signal detection are shown in Fig. 1. The measurements were carried out at shore stations and onboard an atomic submarine that passed across the Pacific Ocean. The signals were received at depths of up to 100 m and at distances of up to 11 000 km.

The positive results obtained served as a basis for designing the main "Sangwin" transmitting antenna, in which the length of the transmitting grounded line was made longer due to the use of a "lattice" of vibrators. The use of several parallel lines allows the construction of a more compact antenna, the moment of which is equal to the geometrical sum of the moments of all the lattice elements.

In the Soviet Union, studies in the field of ELF wireless communication were performed at several research sites, and one of them is located in the north of the Kola Peninsula. In the first stages of the ELF developments in this region, the Kola-Serebryanka industrial 110-km power line was used in the period of its initialization. This line provided the first series of successful experiments on the detection of ELF signals at distances of up to 4000-5000 km.

The next step was the creation of a specially radiating system called "Zeus". It consists of two parallel asymmetric grounded 60-km-long vibrators fed from two sinusoidal-voltage switch-generators that were installed at each of the groundings. The transmitter provides the antenna current of up to 200-300 A, in a frequency range of 20 to 200 Hz [Velikhov et al., 1994]. The sinusoidal current in the antenna can be given on the frequency network with a step of 0.1 Hz. The frequency of the master oscillator is determined by the "Giatsint" system with an accuracy of variations no worse than  $10^{-7}$  s.

The "Zeus" antenna is located on the Murmansk crystalline block of the Archean age. The crust in this region is characterized by very high resistivity exceeding  $10^5\Omega\cdot\text{m}$  at depths of about 10-15 km [Zhamaletdinov et al., 1991]. At the time of designing the "Zeus" antenna, extensive geoelectrical observations were performed in this region with the

purpose of choosing suitable traces for air power lines and the sites of their grounding. The studies were headed by the staff members of the Saint Petersburg University, Prof. A.V. Veshchev and Assistant Prof. A.V. Yakovlev. The electrical exploration revealed the local zone of low resistivity suitable for the siting of power groundings and helped to design the radiation parameters of the antenna.



Fig. 1. Arrangement of the Sangwin and “Zevs” ELF antennas and the location of detection sites.

The successful location of the “Zevs” antenna and high technical parameters of the power installation provided the radiation power sufficient for the reliable detection of signals at a distance of up to 10000 km in the Atlantic and Pacific Oceans (Fig. 1). The estimated equivalent magnetic moment of the antenna is on the order of  $2 \cdot 10^{11}$  A·m<sup>2</sup>.

Many methods for calculating the parameters of propagating ELF waves have been developed [Alpert, 1988; Galleis, 1968; Bernstein et al., 1974; Akindinov et al., 1978; Makarov et al., 1993]. The ELF field is believed to propagate in the Earth-ionosphere waveguide as a vertically polarized, transversely electric *TE* mode. It includes the horizontal component  $H_\varphi$  (longitudinal relative to the waveguide boundaries) and the vertical (transverse) electrical component  $Ez$ . Due to the Leontovich boundary conditions, component  $H_\varphi$  produces electric field  $E_\theta$  at the Earth’s surface. In this case, a part of the energy is scattered downwards as a plane electromagnetic wave provided that  $k_0 \ll k_e$ , where  $k_0$  and  $k_e$  are the wave numbers of air and the lower half-space (the Earth), respectively. Intensity  $E_\theta$  of the horizontal field is determined by the input impedance of lower half-space  $Z_e$

$$E_\theta = Z_e H_\varphi, \text{ where } Z_e = \sqrt{\rho_e \omega \mu_0}.$$

The deep sounding of the Earth in the ELF antenna field can be performed by studying impedance  $E_\theta/H_\varphi$ .

The table lists the calculated electric and magnetic components of the ELF antenna field for the parameters of the “Zevs” source, at the points located along the antenna axis, at different distances from the source. The calculations were made by the formulas given by Bernstein et al. [1974] and Akindinov et al. [1976]. The adopted methods of calculations differ mainly in the procedures of allowing for the attenuation coefficients of ELF waves in the Earth-ionosphere spherical waveguide. Both quoted papers used the same frequency dependence of the attenuation coefficients, which is based on the experimental study of the lightning discharge propagation parameters, the Schuman resonances, and artificial signals from the “Sangwin” source on frequencies of 45 and 75 Hz. The calculations took into account the energy of an incident wave and the wave passing around the Earth along the great circle. The electric

field intensity was derived from magnetic field  $H_\phi$  through the impedance of a homogeneous half-space with a resistivity of  $10^4 \Omega \cdot m$ . The remaining parameters are indicated in the note to the table. One can see that the field values obtained by the formulas of Akindov et al. [1976] are 30% greater than those from the formulas by Bernstein et al. [1974].

Comparative table of the ELF “Zevs” field amplitudes calculated by formulas from various sources

$r$ (km)	Bernstein et al., 1974		Akindinov et al., 1976	
	$H_\phi$ , 0.1 nT	$E_\theta$ , mV/km	$H_\phi$ , 0.1 nT	$E_\theta$ , mV/km
1000	2.57	0.57	3.67	0.82
2000	1.62	0.36	2.33	0.52
3000	1.20	0.27	1.71	0.38
4000	0.94	0.21	1.34	0.30
5000	0.77	0.17	1.09	0.24
6000	0.66	0.45	0.91	0.20
7000	0.57	0.13	0.77	0.17
8000	0.50	0.11	0.67	0.15

Note: The values accepted in the calculations: the underlying space resistivity is  $10\ 000 \Omega \cdot m$ , the height of the ionosphere is 100 km, the antenna length is 60 km, the current in the antenna is 300 A, the attenuation coefficient is 1dB /1000 km, the azimuth of the receiving point relative to the axis parallel to the dipole arm is  $0^\circ$  (axial installation), the source current frequency is 100 Hz, and the ratio of the light velocity to the phase velocity of the ELF wave is 1.4.

In order to gain an impression of the distribution of the “Zevs” ELF antenna field in the CIS territory, Fig. 2 shows an approximate diagram of isolines of the total horizontal magnetic field at a frequency of 100 Hz, for a current of 300 A in the antenna. For longer distances (above 3000 km), when the Earth's sphericity must be taken into account, the calculations were based on the formulas from the paper [Bernstein et al., 1974]. For distances shorter than 3000 km, the electromagnetic field of the “Zevs” source was calculated by the formulas for a horizontal electric dipole in a plane layered medium [Shevtsov, 1995], which are present in section 5 below. The main seismic risk zones in the CIS territory, which are interesting for electromagnetic monitoring with the purpose of earthquake prediction, are hatched in Fig. 2. In the diagram of isolines, one can see that the magnetic field varies from about 0.05-0.07 pT in the seismic risk zones of the northern Caucasus to about 0.04 pT in the Kamchatka region of operating volcanos. As shown below, the modern apparatus is capable of detecting these signals. Records of ELF signals were obtained at many sites in the CIS territory (in Vladivostok, Transbaikalia, the Crimea, and the Caucasus), and the observed field amplitudes were found to be close to those calculated in Fig. 2.

The “Zevs” installation is presently a unique operating object of ELF radio communication. Nevertheless, its obvious advantages described above have a number of constraints. First of all, it is a one-way type of connection, since large wavelengths require enormous antennas with linear sizes of tens and up to hundreds of kilometers. The high losses on radiation require the application of powerful sources. The conversion coefficient is, on average,  $10^{-5}$ ; i.e., each watt of the radiated energy is related to an expenditure of generator energy of up to 100 kW.

Nevertheless, the rapid development of computerized digital data-processing methods, the appearance of modern low-noise antennas for detecting weak signals, as well as wide possibilities for using satellite systems for the synchronization of source and receiver open new ways to develop ELF wireless communication. The principal prospects are related to the development of multipurpose systems intended, on the one hand, to solve the problems of basic and applied geophysics, and on the other hand, to further expand the possibilities of ELF systems for working in the interests of the Russian navy. This paper is devoted to the results of studies obtained with the “Zevs” antenna for solving geological and geophysical problems.

### 3. Soundings in the near-field zone of the ELF antenna

Already, in designing the “Zevs” radio transmitter in this region, vertical electromagnetic soundings were carried out to choose the trace of an air power line and areas for grounding. These works continued with the use of natural and controlled electromagnetic sources for improving the radiating parameters of the antenna.

In 1989, the problem on the use of the “Zevs” ELF antenna was stated in the framework of the program “Conversion” for solving the tasks of deep sounding of the crust and studying the ore field structure.

In the first step, in 1990-1991, a series of deep DC pulse soundings was performed by connecting an ERS-67 external source of the 29-kW power directly to the ends of one of the antenna. A current of 25 A was delivered to the

line, in the form of alternating rectangular pulses with a pulse spacing of 8 s. The digital detection with the subsequent stacking was made with the help of the TsAIS apparatus. Three components of the electric field were measured at each point: two mutually orthogonal and the third component turned at an angle of 45° to the first two components. This allowed the estimation of the direction of the total horizontal vector, along with its modulus. The position of the observation sites was chosen in arbitrary parts of the plane table, depending on the presence of roads (Figs. 3a, 3b). The results were treated and interpreted for the total vector of the horizontal electric field  $|\mathbf{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$  for  $\partial E/\partial t \rightarrow 0$ .

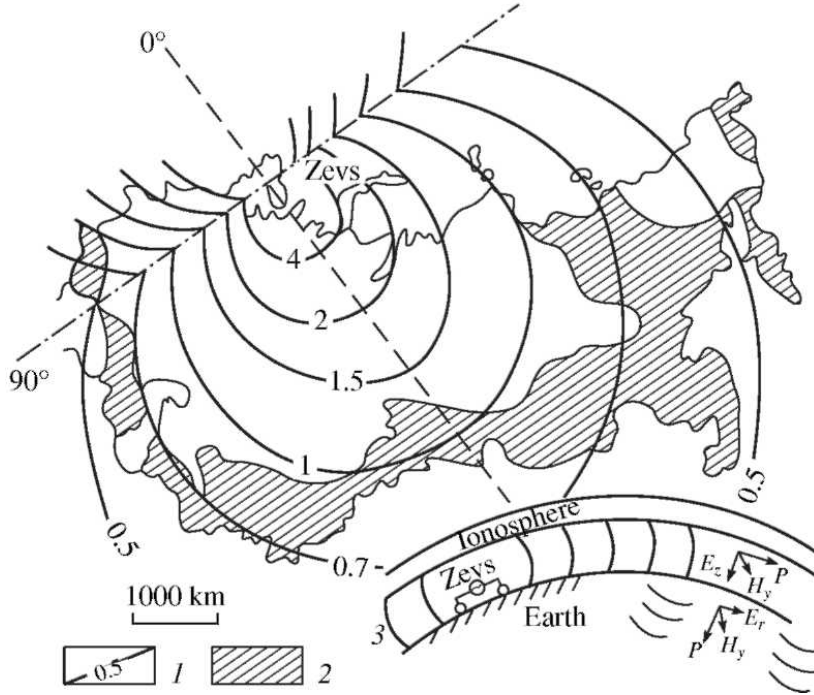


Fig. 2. Isoline pattern of the total horizontal magnetic field from the “Zeus” source in the CIS territory from theoretical calculations. (1) Magnetic field isolines (in  $10^{-4}$  nT), (2) seismic risk zone in the CIS territory, (3) schematic propagation of ELF signals in the Earth-ionosphere waveguide. Dashed-dotted lines are the axial ( $0^\circ$ ) and equatorial ( $90^\circ$ ) lines of the “Zeus” source on the map.

The field was normalized with the help of geometrical coefficient  $K$  defined as a quantity inverse to intensity  $E_0$  of the field created by the superposition of the power line groundings above a homogeneous half-space with  $\rho = 1\Omega\cdot\text{m}$  [Zhamaletdinov et al., 1981].

$$E_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{r_A^{-4} + r_B^{-4} - \frac{r_A^2 + r_B^2 - L^2}{(r_A r_B)^3}}$$

where  $r_A$  and  $r_B$  are the distances from an observation point to groundings  $A$  and  $B$ , respectively.

The working separation parameter was calculated by the empirical formula  $r^{eff} = r_A + 0.5(r_B - r_A)(r_A / r_B)^2$ , where  $r_A < r_B$ .

The calculations of the theoretical curves showed that the adopted parameter of the effective separation allows us to reduce the sounding curves, obtained at various angles to line  $AB$ , to a unified comparable form. The soundings with the “Zeus” antenna were combined with the previous soundings by the MHD generator “Khibiny” [Zhamaletdinov, 1990] and with the results of dipole frequency sounding from an additional grounded dipole  $A_2B_2$  (Fig. 3b) on low frequencies corresponding to the near-field zone [Zhamaletdinov et al., 1991]. The obtained results were used to construct a unified curve of distant sounding with a separation of up to 350 km (Figs. 3c, 3d). It can be seen that the apparent resistivity has a large scatter indicating the great inhomogeneity of the upper crust. In most cases, we succeed in establishing the relationship between the abrupt deviations of  $p_a$  toward lower values and the location of observation sites in the zones of tectonic disturbances or within specific geological formations characterized by a high content of electron-conducting carbonaceous rocks.

Figures 3c, 3d show two alternative interpretations of the results: the K-type section with a thick poorly conductive crust, including a smooth decrease in conductivity at depths of 30-40km, i.e., at the Moho level (Fig. 3c), and the section with an intermediate conductive layer at a depth of 10-20 km (Fig. 3d). The transverse resistivity of the

crust  $T = h\rho$  is estimated at  $4 \cdot 10^9 \Omega \cdot \text{m}^2$ , for an average crustal resistivity of  $10^5 \Omega \cdot \text{m}^2$  and a crustal thickness of 40 km. One or another of the models is chosen by the interpreter and, until recently, has remained questionable. These rather uncertain estimates exhaust the possibilities of the geometrical (distant) principle in the studies on the deep structure of the crust, since, in the course of increasing the separations and sounding depth, the receiver must move to new geological conditions, which leads to the accumulation of uncontrolled errors.

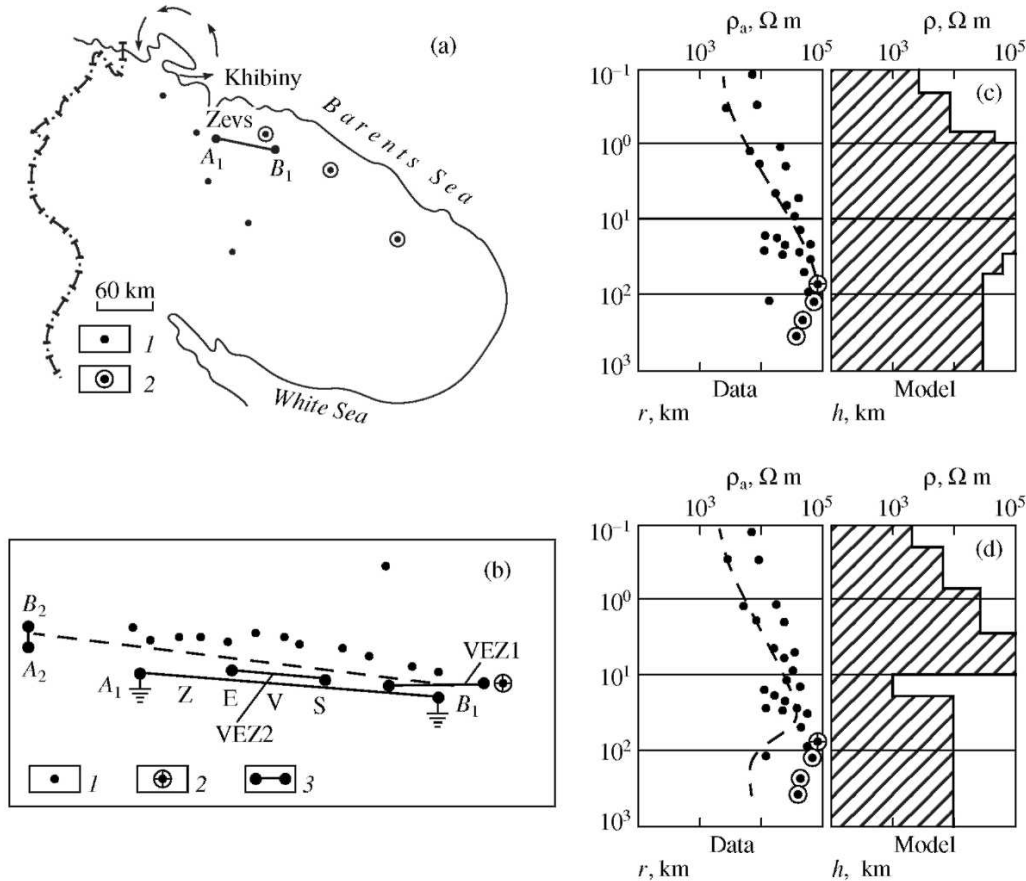


Fig. 3. Results of DC electric soundings in the field of the “Zevs” ELF antenna and Khibiny MHD source in the Kola Peninsula. (a) location of the receiving sites at large distances of 20–400 km from (1) the “Zevs” and (2) Khibiny sources. (b) location of the sounding sites at small distances from (1) “Zevs”, (2) dipole ERS-67, and (3) VEZ (with AB/2 of up to 8 km) sources. (c, d) two fitted versions of the electrical section model.

#### 4. Studies with the “Zevs” source in ore regions

The principal prospects of deep soundings are related to the use of the “Zevs” source in the frequency mode, when the variation in the sounding depth is reached due to the skin effect. As the frequency decreases, the skin thickness increases and so does the depth of the field penetration into the Earth. Such studies were first carried out in the Pana-Tsaga platinum-bearing province, 120 km south of the ELF antenna (Fig. 4). The current was delivered to the line from two sources: the ERS-67 general group in a frequency range of 1 to 1000 Hz and the main “Zevs” power installation in a narrower frequency range of 31.2 to 166 Hz, with a frequency step of  $\sqrt{2}$ . The measurements were made in 1991 with a single-channel analog receiver working on the super heterodyning principle.

At all the observation sites, we obtained unusual descending curves of apparent resistivity with several bend points. These latter can be formally interpreted as thin conductive layers at depths ranging from 1.7 to 7 km. The soundings were performed at five sites spacing, on average, 10 km apart (Fig. 4b). With such a rare network, it is difficult to closely interpret the data, especially in the geologically complex Pana-Tsaga rivers region. Nevertheless, the regular course of the obtained  $\rho_{\omega}$  curves enables us to construct the electrical section (Fig. 4a) in which we observe conductive layers gently sloping toward the north. The uppermost position of the top of the upper conductive layer, at a depth of 1.7 km, was fixed at point 1 (Fig. 4b). This suggests the gently sloping dip of the conductive base toward the northeast. This conclusion agrees with the location of seismic reflection boundaries in Fig. 4a and with the general geological views of a trough-like structure of the region with the same dip of the boundaries toward the northeast.



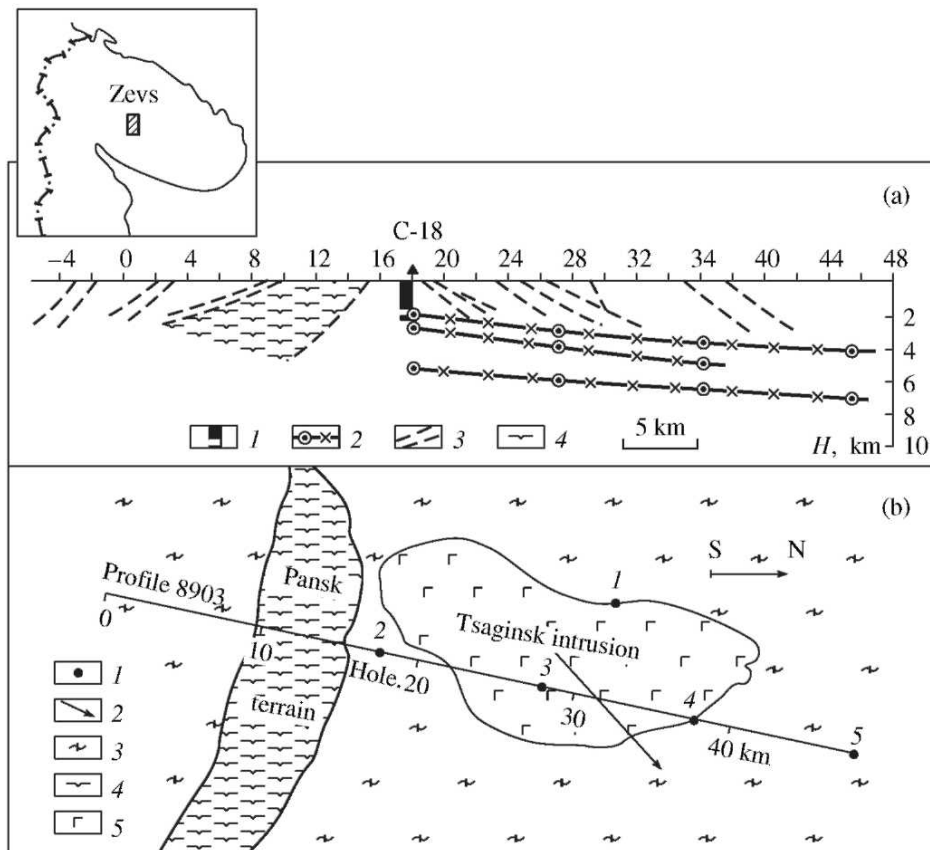


Fig. 4. Results of deep soundings with the “Zevs” source in the areas of the Pana and Tsaga intrusions. (a) Deep seismogeoelectrical section: (1) diagram of the S-18 hole electrical logging, (2) conductive layers from the interpretation of soundings with the “Zevs” ELF antenna, (3) seismic reflection planes, (4) basic and ultra basic rocks in the Pannonian terrain. (b) Location of the observation profile on the geological map in plan: (1) points of soundings with the “Zevs” source, (2) the direction of dip of the conductive base from sounding results, (3) enclosing gneisses, (4) Pannonian terrain rocks, (5) Tsaga intrusion rocks.

At the northern flank of the Pana layered intrusion hole S-18 was subsequently drilled near the sounding site no. 2. The drilling at a depth interval of 1.7 to 1.95 km revealed the conductive horizon with a resistivity lower than  $10^3 \Omega\cdot\text{m}$  (Fig. 5c). The logging technique did not give the exact value of resistivity in the conductive layer. Its nature is related to the titanium-magnetite mineralization that controls the position of a promising platinic ore zone. The location of this horizon is satisfactorily consistent to the position of the upper conductive layer found in the deep soundings with the “Zevs” source (Figs. 5a, 5b). The apparent resistivity curves in Fig. 5a were interpreted on the basis of the  $H$ -asymptotic of the wave curves shown in Fig. 5a by thin lines drawn at an angle of  $63^\circ$  to the ordinate. A similar result is obtained from interpreting the  $\rho_\omega$  curve by the Molochnov-Viete method of differential transformations. At the same time, the selected solution to the forward problem gives only a smoothed curve with

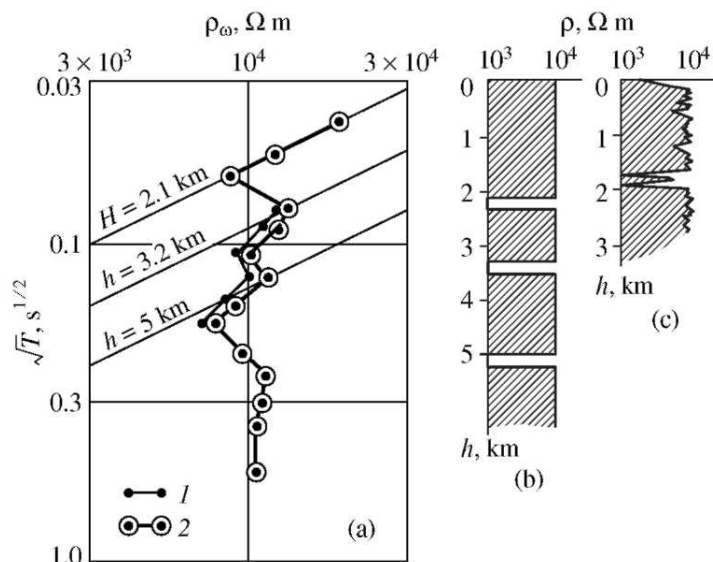


Fig. 5. Example of the fitted electrical section model from soundings with the “Zevs” source in an area of the S-18 hole (Pana-Tsaga region). (a) Apparent resistivity curve, (b) the one-dimensional section fitted by the approximation method, (c) resistivity section from logging data.

a high resolution only for the upper conductive layer and with a low resolution for the two lower layers. Since the intermediate bends in the  $\rho_{\omega}$  curve (Fig. 5a) were confirmed by two independent methods of current generation in the “Zevs” antenna, these bends are not noise. Their nature may be caused, to a considerable extent, by regional features of the horizontal inhomogeneity of rocks.

At sites 1 and 2 (Fig. 4), the soundings were also made by using the transient field from the “Zevs” antenna, by generating in it the rectangular signals from the ERS-67 general group, with a period of  $T = 8$  s. The measurements and subsequent processing were conducted in the deep stacking regime. At the same site, the magnetotelluric soundings were subsequently carried out with the use of the TsAIS apparatus [Askerov et al., 1989]. Joint data processing gave the summary curve of the frequency sounding in a frequency range of 0.001 to 1000 Hz. The obtained sounding curves are characterized by a regular drop in the apparent resistivity from about  $10^4 \Omega\cdot\text{m}$  for the 1000 Hz frequency to about  $10^2 \Omega\cdot\text{m}$  along the minimal curve for a frequency of 0.001 Hz. This suggests a substantial anomaly in the region, i.e., the possible extension of a unified conductive layer at depth. Such a proposal was first set forward by N.F. Skopenko [1985] on the basis of studies using the small-scale charge method.

Deep soundings with the “Zevs” source were also carried out in the Monchegorsk ore region, with the use of the ERS-67 general group in the frequency mode. The sounding was made near the Loipeshnyun hole. These data showed that the resistivity at depth is lowered, in agreement with the position of a conductive copper-nickel layer that was previously found at a depth of 1.5 km in the hole. An important feature of these observations is also the presence of high-resistivity (greater than  $10^6 \Omega\cdot\text{m}$  in the upper section part) crystalline rocks in the crust, which was corroborated by logging (up to  $2\cdot 10^6 \Omega\cdot\text{m}$ ).

Thus, the use of the “Zevs” antenna along with the ERS-67 truck generator with a power of 29 kW provides deep geoelectric studies virtually in all of the ore zones on the Kola Peninsula. Moreover, the use of the main 2.5 MW power installation expands the possibilities of the “Zevs” ELF antenna far beyond the borders of the Kola Peninsula, covering the entire Karelian-Kola region and adjacent territories of Finland and Norway.

### 5. Deep studies of the crust regard to the ionospheric effect

Deep studies of lithospheric conductivity with the “Zevs” source are the direct continuation of the sounding program with the “Khibiny” MHD generator of a power of 80 MW [Velikhov and Volkov, 1982]. The MHD soundings were used to develop the schematic integral block structure of the crustal conductivity in the northeastern part of the Baltic Shield, to construct the model for the deep structure of the lithosphere, and to estimate its conductivity to depths of 100-150 km [Zhamaletdinov, 1990].

However, the low-frequency spectrum of pulse signals from the “Khibiny” MHD source (0.05-2 Hz), which is a consequence of the low resistivity of the medium where the radiating circuit was located (the sea area around the Srednii and Rybachii peninsulas), did not allow the detailed study of the crust in an intermediate depth interval from units to tens of kilometers. Consequently, the “Zevs” source soundings are of special interest to studies of the lithosphere in the Baltic Shield.

Owing to its high power, “Zevs” provides frequency soundings at great distances from the source, under the conditions of the wave zone. This, in turn, allows the geoelectric zoning of the crust over the entire Baltic Shield for the same location of the source and gives the possibility to assess the physical and thermodynamic state of geoblocks (their porosity, fluid regime, and temperature) in various geological settings from the deep variations of electrical conductivity.

The principal advantages of the “Zevs” source, compared to the “Khibiny” circuit, are its following parameters: the location within the homogeneous Murmansk block, regular geometry (two rectangular lines grounded on the ends and 55 and 60 km long), the sinusoidal current given with a high accuracy, the possibility of precision current measurements and the environmental safety.

In 1992, the deep sounding experiment with “Zevs” was made at the southern margin of the Baltic Shield (in southern Finland), at distances from 920 to 1100 km. The measurements used a SChZ-92 digital station developed at the Geological and Polar Geophysical institutes, the Kola Research Center, Russian Academy of Sciences [Tokarev et al., 1997]. The magnetic field transducers were inductive coils, and the electric field transducers were grounded nonsymmetrical lines 300-500 m long. After the preliminary magnification, the measured signal enters the mixer where the preliminarily filtered and magnified valid signal was multiplied by the heterodyne signal. The heterodyne frequency differed from that of the valid signal by 1 Hz. The SChZ-92 difference frequency separated by the mixer passes through the two-cascade selective amplifier and enters the 20-digit analog-to-digital converter (ADC). The discretization frequency of the ADC valid signal is 20 Hz in a dynamic range of 100 dB. After the analog-to-digital conversion, the signal enters the portable computer Note Book 486-DX through the RS-232 connector. Fig. 6 shows an example of signal detection with the “Zevs” antenna at the site of Parkano (Finland), at a distance of 920 km. One can clearly see that the signal exceeds the noise in all five components of the electromagnetic field, with average values of 0.2-0.4 nT in the magnetic field and 1.5 mV/km in the electric field. The obtained magnetic field values agree with the calculated results given in the table. The measured electric field values exceed the calculated results, since the adopted resistivity of the lower half-space ( $10^4 \Omega\cdot\text{m}$ ) is substantially lower than that fixed at Parkano.

The main feature of the first experimental results was a great variance between the impedance curves of apparent resistivity  $\rho_T$  and the curves of  $\rho_{\omega}$  in the electric field. This feature is explained by the weak attenuation of ELF waves in the Earth-ionosphere waveguide. For this reason, the commonly accepted normalization of the electric

and magnetic components with respect to a homogeneous lower half-space, separated by a plane boundary from the upper half-space (air), without regard to the ionosphere, gives the resistivity values overestimated approximately by one order of magnitude. In the normalization with respect to the impedance, the ionospheric effect is compensated due to its approximately equal influence on the parameters of the electric and magnetic component propagation. Due to this value,  $\rho_T$  calculated from the effective impedance reflects the real electrical properties of the lower half-space under the wave zone conditions.

The first obtained data for the ionospheric effect on the deep sounding results were confirmed in 1993 by observations along the regional Kola-Karelia-Finland profile. The location of the profile and the observation sites are shown in Fig. 7. These sites were located dominantly within homogeneous poorly conductive blocks whose positions were chosen on the basis of the previous soundings with the “Khibiny” MHD generator [Zhamaletdinov, 1990].

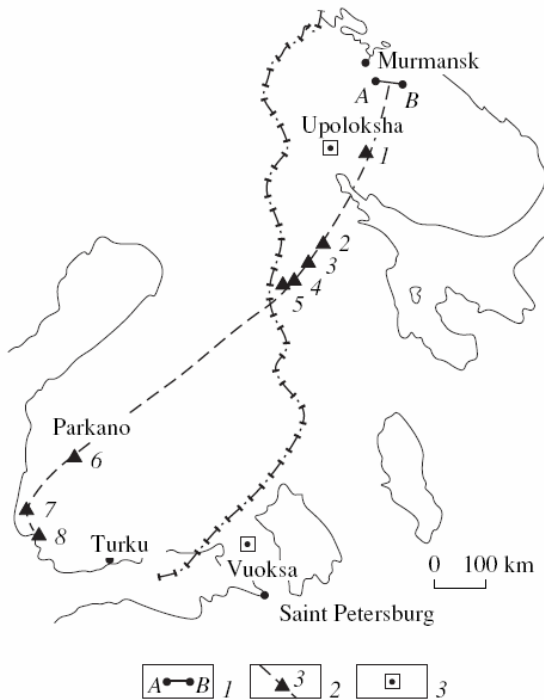


Fig. 7. Location of the “Zevs” observation profile along the Kola-Karelia-Finland line. (1) “Zevs” source, (2) profile and numbers of observation points, (3) the geophysical research sites Upoloksha and Vuoksa.

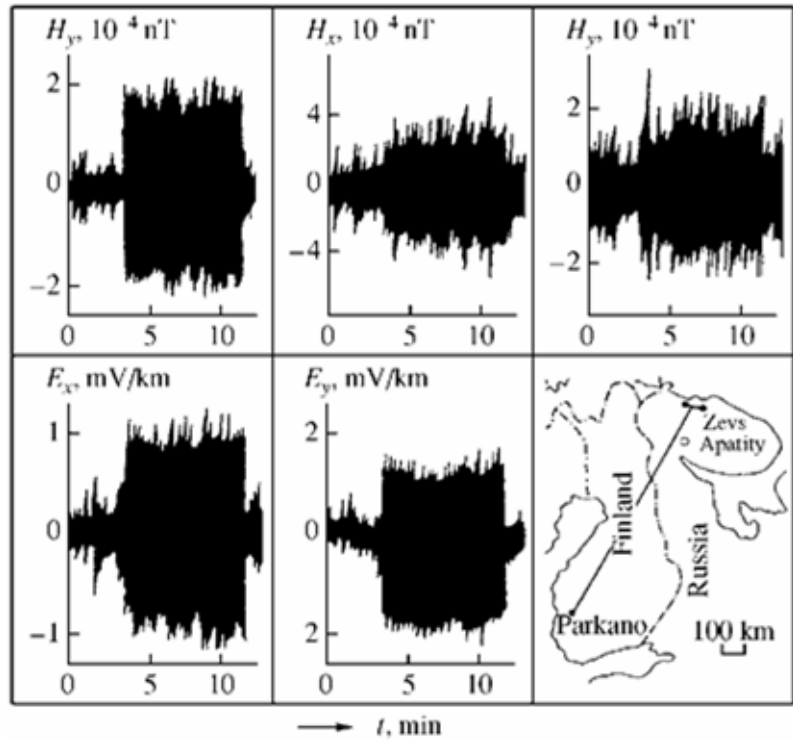


Fig. 6. Example of the five-component record of “Zevs” signals at Parkano (Finland), at a distance of 920 km from the source (on a frequency of 125 Hz).

Fig. 8 presents the results of soundings along the Kola-Karelia-Finland profile. The curves of apparent resistivity were obtained with the use of normalization by the total electric field

$$\rho_{\omega}^{tot} = K^{tot} E^{tot},$$

where

$$E^{tot} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2},$$

$$K^{tot} = \frac{K_x K_y}{\sqrt{K_x^2 + K_y^2}},$$

and  $K_x$  and  $K_y$  are the geometrical coefficients for components  $E_x$  and  $E_y$  in the wave zone.

The curves of apparent resistivity  $\rho_i^{eff}$  were obtained by normalization with respect to the total impedance

$$\rho_i^{eff} = 0.2T |Z^{eff}|^2$$

where  $Z^{eff} = \sqrt{E_x E_y / H_x H_y}$

The results present in Fig. 8 show a great difference between the  $\rho_{\omega}^{tot}$  and  $\rho_T^{eff}$  curves. The former, obtained from the total electric field, on average, monotonically drop at all points. It might seem that such a behavior suggests a decrease in resistivity with depth, however, the impedance curves of apparent resistivity  $\rho_T^{eff}$  are of a totally opposite character: they ascend, with a small deviation at point I, where the effect of the Imandra-Varzuga conductive structure, located 10 km to the north, was probably

manifested. Another important feature of the experimental data is that the  $\rho_{\omega}^{tot}$  curves are shifted upward, along the resistivity axis, with distance from the source. At a distance of 920 km,  $\rho_{\omega}^{tot}$  reaches exotic values of  $(5-7) \times 10^5 \Omega \cdot m$ . Such behavior of the  $\rho_{\omega}^{tot}$  curves is explained by the effect of the ionospheric waveguide. Due to this effect, the amplitudes of the electric and magnetic field components are eight times higher than similar amplitudes calculated for a layered half-space.

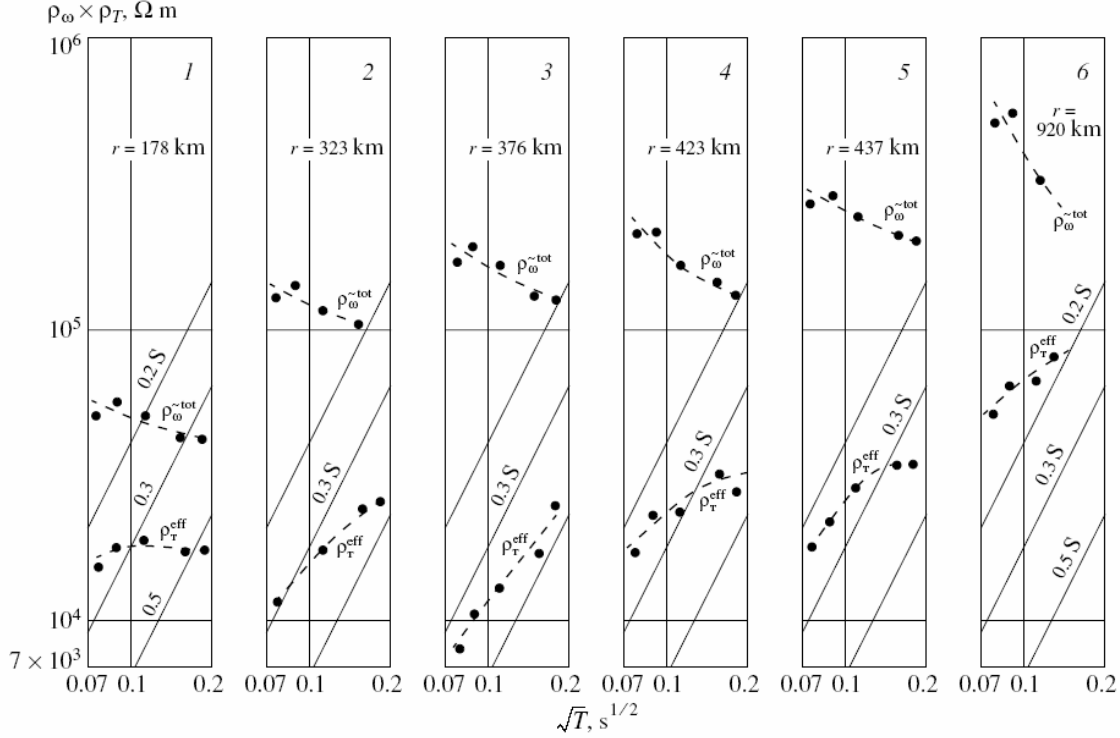


Fig. 8. Results of the soundings with the “Zevs” source along the Kola-Karelia-Finland profile (the location of points and their numbers are given in Fig. 7).  $\rho_{\omega}$  is the apparent resistivity curves for the total electric field  $E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ , and  $\rho_T$  is the same for the effective impedance  $Z^{eff} = \sqrt{E_x E_y / H_x H_y}$ .

This increase is quite accurately coincident with the estimates by the empirical formula accounting for the increase in the bond energy in a zero-order wave [Bernstein et al., 1974]

$$E_a / E_0 = \lambda / 4h$$

where  $\lambda$  is the wavelength in air (3000 km for  $f = 100$  Hz) and  $h$  is the height of the ionosphere (about 100 km).

Analysis of the physical nature of the obtained apparent resistivity curves requires calculations of the ELF electromagnetic field in the Earth-ionosphere waveguide, taking into account the properties of the lower half-space. The theory for such calculations based on the analysis of the impedance spectrum components was developed by Makarov et al. [1993]. This theory allows us to find the field values for an arbitrary dependence of the Earth's properties and ionosphere on the radial coordinate. The solution is sought for by using the zonal and normal harmonics that are used to construct the solution in the form of a quasi-geometrical-optical series. However, this approach is applicable only at high frequencies ( $>1000$  Hz) and for large distances from the source (greater than 1000 km).

In deep studies in the ELF range, at relatively small distances (to 2000-3000 km), the Earth's sphericity can be neglected, and the problem may be replaced by a plane one. In this case, the more accurate estimates are given by the electrodynamic method based on the calculation of the electromagnetic field components above a plane one-dimensional horizontally layered model of the lower half-space, in the presence of a plane interface (ionosphere) in the upper half-space. The ionosphere can also be represented by a layered model. The general solution to this problem was present by Boerner and West [1989]. Their equations completely describe the electromagnetic field in a one-dimensional layered medium without any approximations or assumptions. The equations were used in the development of the program of the solution to the forward problem of soundings with the “Zevs” source [Shevtsov, 1995].

In the solving algorithm, the quasistationary constraint was not introduced, and, consequently, the calculated results allowed the study of both wave and diffusive limiting cases in the electromagnetic field propagation. It was assumed that the field generation did not affect the current in the source. The Hankel transformations were calculated to a given accuracy by using the direct integration between the zeros of the Bessel functions, including the Pade

approximation of the integrand [Chave, 1983]. The extension of the solution to a more general case of the spherical Earth can be obtained by expansion in spherical harmonics instead of the Bessel cylindrical functions [Whate, 1987; Sochel'nikov, 1979].

The developed program was used to calculate the field of the “Zevs” source at particular observation points. As an example, Fig. 9 shows the results calculated at the site of Parkano ( $r = 920$  km), allowing for the effect of the ionosphere with a resistivity of  $10^4 \Omega\cdot\text{m}$ , located at a height of 100 km. Two cases were calculated: with ( $\varepsilon = 0$ ) and without ( $\varepsilon = 1$ ) regard to the displacement currents. For the former case, the p curves are given with the subscript “I” (only the ionosphere influences), and for the latter case, the subscript “i + dc” (both the ionosphere and displacement currents influence) is used. Figure 9 also presents the experimental curves for the total electric field  $\rho_\omega^{\text{exp}}$  and effective impedance  $\rho_T^{\text{exp}}$ .

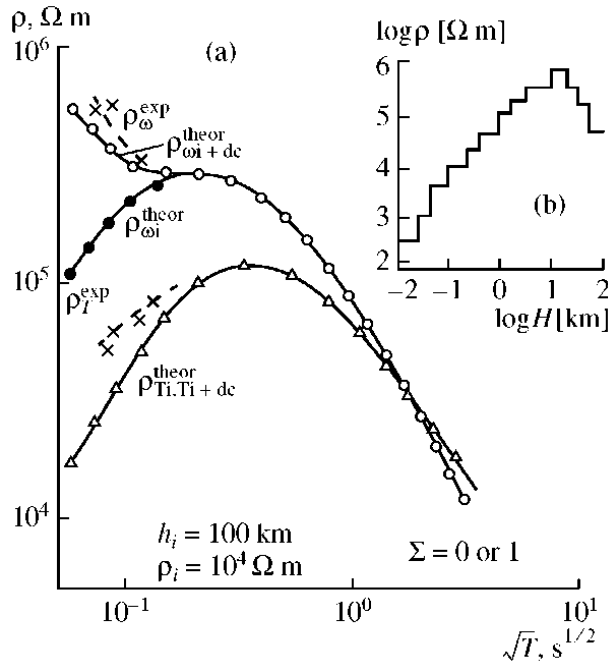


Fig. 9. (a) Theoretical and experimental curves of the apparent resistivity in the “Zevs” source field at Parkano, at a distance of 920 km from the “Zevs” source. (b) The lower half-space model accepted in the calculations.  $\rho_T^{\text{theor}}$  and  $\rho_T^{\text{exp}}$  are the theoretical apparent resistivity curves for the total impedance, respectively,  $\rho_\omega^{\text{theor}}$  is the theoretical apparent resistivity curves for the total electric field  $\rho_{\omega i}$  and  $\rho_{\omega i+dc}$  are the curves allowing for the ionospheric effect and both the displacement currents and ionosphere, respectively;  $\varepsilon = 1$ ),  $\rho_\omega^{\text{exp}}$  is the same type curves obtained experimentally. The ionosphere parameters used in the calculations:  $h = 100$  km is the height and  $\rho_i = 10^4 \Omega\cdot\text{m}$  is the resistivity.

From Fig. 9, one can see that the  $\rho_T^{\text{theor}}$  impedance curves are virtually independent of the displacement current and ionospheric effect. In the wave zone, these curves adequately reflect the properties of the given lower layered half-space.

The  $\rho_\omega$  curves exhibit their dependence on both the ionosphere and displacement currents. The ionospheric effect is significant already on a frequency of 1 Hz. With an increase in the frequency to 10-20 Hz, the effect is enhanced, resulting in the gradual divergence of the impedance and component curves of apparent resistivity. For higher frequencies of 20 to 500 Hz, the ionospheric influence is stabilized and leads to the parallel shift of the  $\rho_T^{\text{theor}}$  and  $\rho_\omega$  curves (Fig. 9). The displacement current effect is observed only in the left high-frequency branches of the curves and is manifested in their abruptly ascending shape for frequencies of 80 to 100 Hz and higher. Such behavior of the  $\rho_\omega^{\text{theor}}$  curves agrees with that of the experimental  $\rho_\omega^{\text{exp}}$  curve.

The above analysis of the theoretical and experimental results with the “Zevs” source shows that these results can be brought into agreement only by allowing for the displacement current effect, along with the ionospheric effect. Such a conclusion is at variance with the usual opinion that, for slowly varying fields, it is possible to neglect the displacement current and to restrict ourselves to a quasistationary model described by the diffusion equations. In this case, the quasistationary condition is determined by the inequality  $\omega\varepsilon \ll \sigma$ , where  $\varepsilon = 8.84 \times 10^{-12}$  F/m. It directly follows that, for  $\sigma = 10^4 \Omega\cdot\text{m}^{-1}$ , the quasistationary condition holds true in a frequency range from zero to  $10^6$ - $10^7$  Hz. However, in this case, the displacement currents in air are not automatically taken into account. The actually observed effect of displacement currents on super low frequencies is explained by the fact that a finite velocity of electromagnetic field propagation from the source to the receiver must be included in the interpretation of deep soundings [Vanyan, 1997]. Then, the quasi-stationary constraint is added by the condition  $r \ll \lambda_0/2\pi$ , where  $r$  is

the source-receiver distance and  $\lambda_0$  is the wavelength in air,  $\lambda_0 = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ . The constraint on the wavelength in air

gives rise to the fact that, for example, for a separation of  $r = 500$  km, the quasistationary condition holds true only in a range from zero to 100 Hz.

In total, the experimental and theoretical curves in Fig. 9 are in agreement with each other. In order to achieve complete agreement, additional calculations are required, with the use of more realistic values of relative permeability  $\epsilon$  and more accurate data on the electric conductivity of the Earth and ionosphere. Given the conductivity of the Earth, the parameters of the ionosphere can be fitted more accurately and *vice versa*. However, such a problem is beyond the scope of this paper. In studying the conductivity of the Earth, we can restrict ourselves to the results of the impedance processing of data for the distances exceeding the wavelength in the Earth ( $r \gg \sqrt{10\rho T}$ ). This condition holds true over the entire ELF range, at distances greater than 300 km, for an average medium resistivity of  $10^5 \Omega \cdot m$ .

The summary diagram of the results of soundings with the “Zevs” source (impedance curves) is present in Fig. 10. The data of deep soundings with natural and controlled sources on the Baltic Shield are also given in Fig. 10. All these results were selected from measurements on a fortiori homogeneous, poorly conductive blocks of the crust. It is remarkable that the  $\rho_T^{eff}$  impedance curves, obtained with the “Zevs” source, are grouped in a band covering the lower part of the hatched zone of probable  $\rho_\omega$  values for the Karelia-Kola region, the part found from the frequency and MHD soundings and referred to as the “normal” section. These results contrast with the  $\rho_T$  distributions in Fig. 10, obtained with the help of natural sources in the Russian territory of the Baltic Shield [Vanyan et al., 1980; Kovtun et al., 1986] and in central Finland [Korja, 1990].

Many authors believed that the use of grounded (galvanic) electromagnetic generators in the installations of power lines, Khibiny MHD source, “Zevs” antenna, etc. is one of the causes for the observed differences in the interpretations of soundings with natural and controlled sources. In this case, along with the inductive component, the original field contains the galvanic mode with the vertical electric component, whose role is enhanced as the frequency drops and the separation decreases. Under conditions of the K-type section, the galvanic mode is weakly sensitive to the lower conductive layer, since the intermediate poorly conductive layer hinders the penetration of current into the lower half-space, and the current spreads mainly in the upper layer.

In order to analyze the resulting situation, we calculated the electromagnetic field of the “Zevs” antenna along the route oriented at an angle of  $60^\circ$  to the dipole axis, corresponding to experimental data (Fig. 7), for two geoelectrical models: the K-type normal section with a poorly conductive layer (Fig. 11e, model 1) and the same section containing, however, an intermediate conductive layer at a depth of 10 km (Fig. 11e, model 2). The longitudinal conductivity of the layer was set at 250 S, and its thickness was 10 km, which corresponds to data for the Murmansk block [Kovtun et al., 1986]. The results of the calculations and the accepted models are present in Fig. 11. The ionospheric and displacement current effects were taken into account in a frequency range of 0.01 to 1000 Hz, for the separations ranging from 50 to 800 km.

The calculated results for model 1, with the normalization relative to the impedance and electric field  $E_x$  parallel to power line  $AB$ , are shown in Figs. 11a and 11b, respectively. The right ascending branches of the impedance curves reflect the decreased influence of the wave zone with an increase in the separation. The  $\rho_T$  curves almost coalesce at separations of 600-800 km. The doubled thick line in Fig. 11a is the averaged experimental data of soundings with the “Zevs” source for separations of 300-900 km. These data are not beyond the bounds of the left ascending curve caused by the resistivity increased with depth.

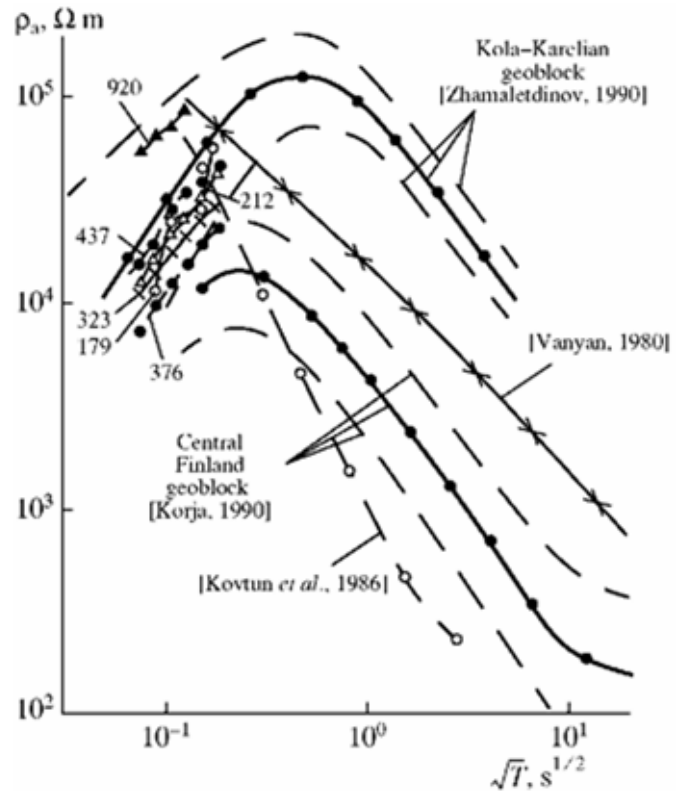


Fig. 10. Summary diagram of the normal apparent resistivity curves for the Baltic Shield from data obtained by various authors and the comparison with the results of “Zevs” antenna soundings at different distances from the antenna. Digits at the curves are the distances (in km) from the antenna. The  $\rho_\omega$  are normalized with respect to the effective input impedance.

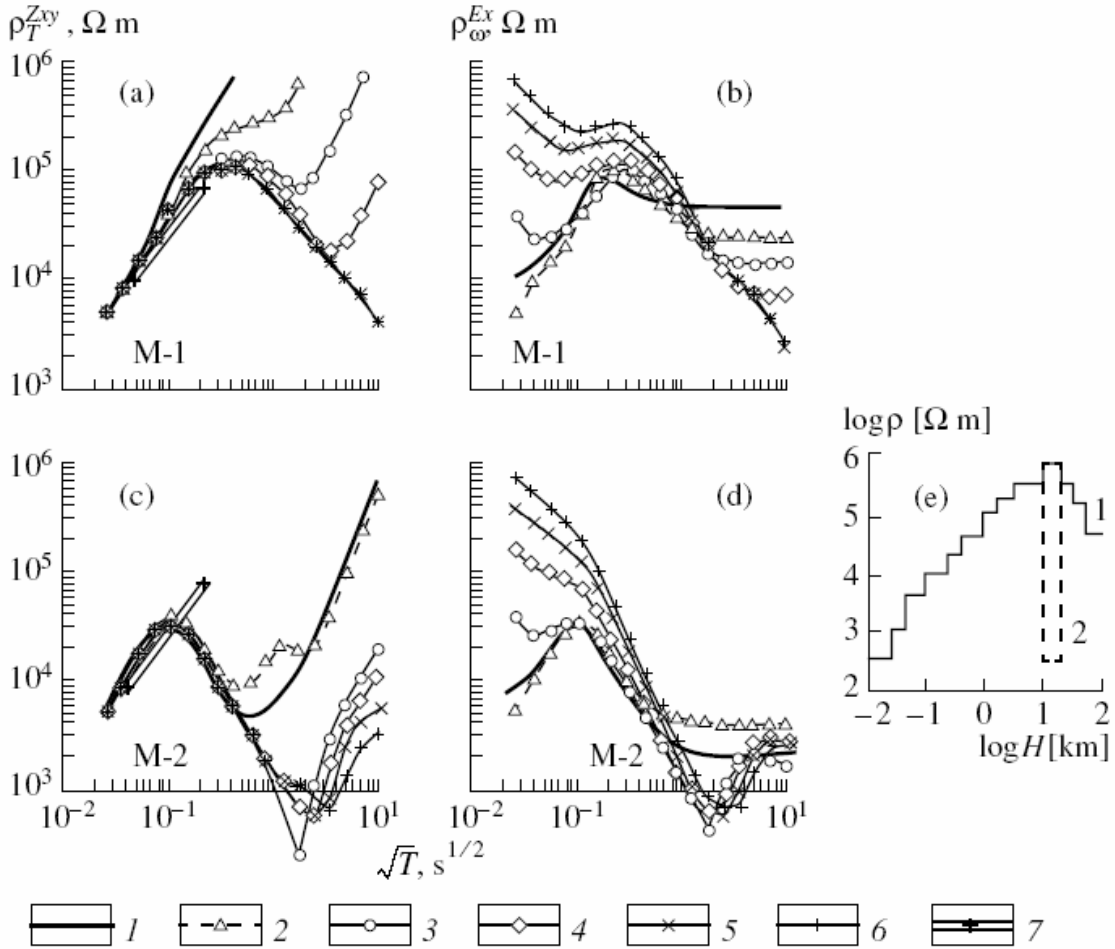


Fig. 11. Comparison of the experimental data from deep soundings in the “Zevs” antenna ELF field with theoretical results for two section models. (a) and (b) Calculations for the normal gradient-layered K-type model (model 1 in Fig. 11e). (c) and (d) Calculations for the normal model with an intermediate conductive layer at a depth of 10 km (model 2 in Fig. 11e). (a) and (c) Theoretical curves with normalization with respect to the input impedance; (b) and (d) the same curves with normalization with respect to electric field  $E_x$  parallel to power line AB. (e) Models 1 and 2. Notation: (1)-(6) theoretical curves for different distances between the “Zevs” antenna and reception points: 1, 5; 2, 100; 3, 200; 4, 400; 5, 600; and 6, 600; (7) average position of the generalized apparent resistivity curve based on the input impedance, for the “Zevs” source and separations from 300 to 900 km (from experimental data).

The  $\rho_\omega$  curves for electrical component  $E_x$  reflect the joint effect of the ionosphere, displacement currents, and varying wave stage. One can see that the galvanic mode has the prevailing effect for a separation of 50 km: the  $\rho_\omega$  curve is of the two-layer ( $\rho_2 > \rho_1$ ) type, reaching the direct current at frequencies of 50-100 Hz. With a further increase in the separation, the right  $\rho_\omega$  branches undistorted by the ionosphere and displacement currents are virtually coincident with the impedance  $\rho_T$  curves.

For the model with an intermediate conductive layer at a depth of 10 km, the apparent resistivity curves change their shape (Figs. 11c, 11d). For all the separations, we see the abruptly ascending impedance curves already at frequencies of 80-100 Hz, suggesting the presence of the conductive layer at the 10-km depth (Fig. 11c). A similar picture is observed for the apparent resistivity curves calculated for electrical component  $E_x$ ,  $\rho_\omega$ .

The experimental data of the “Zevs” source, shown in Fig. 11c, are close to the theoretical curves and are contradictory to the proposal on the possible existence of the conductive layer at a depth of 10 km. The obtained electrical section exhibits the natural pattern of an increased resistivity in the upper crust with the increasing depth of sounding up to 10-20 km. On the order of magnitude, the resistivity values agree with laboratory data and can be used to study the further features in the physical state of the crust. For the more complete solution to the problem, it is desirable to expand the frequency range in the direction of low frequencies, at least, up to the maximum on the apparent resistivity curve and its further drop, i.e., up to a frequency of about 1 Hz.

Thus, the tests of the “Zevs” power installation in the on-duty regime showed that such deep geoelectrical studies can be fundamentally performed in the almost entire Baltic Shield. The portable frequency sounding

equipment developed at the Geological and Polar Geophysical Institutes, Kola Research Center, can be used in these measurements.

### 6. Other promising research with the “Zevs” source

The large distance over which the signals from “Zevs” propagate and their low-frequency spectrum determine wide possibilities of its use in various fields of geophysics. Below, we list some of the possible directions of research, taking into account that this paper is an overview and we are interested in a wide cooperation with various potential participants of future works.

#### Electromagnetic Monitoring for Earthquake Prediction Problems.

Of the various possible uses of the “Zevs” source in the national economy, the most interesting problem is the electromagnetic monitoring of the Earth's stress state with the purpose of earthquake prediction.

To this time, generally accepted criteria for earthquake prediction do not exist, and all the efforts to solve this problem end in conclusions on the necessity to apply a multidisciplinary geological-geophysical approach based on several methods. Of them, seismology and geoelectrics are most often used.

The “Zevs” installation itself is located in a low-seismicity zone. The nearest objects of interest for seismic safety monitoring are the Kola atomic power station (APS) located in a zone of the Kandalaksha graben influence and the Lesnoi Bor APS in the Leningrad region. More remote areas (Fig. 2) are in the zone of weak “Zevs” influence (Fig. 2). Nevertheless, observations suggest that the «Zevs» source signals can be convincingly detected in the greater part of the CIS seismic zones. The apparatus of the AKF (autocorrelative function) series developed at the Research Institute of the Crust, Saint Petersburg University, satisfies the necessary requirements.

In December of 1995, by the initiative of the Ministry of Emergency Situations (MES), this apparatus was used in tests at the Caucasus Mineral'nye Vody seismic prediction site, at a distance of 2700 km from the “Zevs” antenna [Saraev et al., 1997]. In spite of unfavorable winter conditions and a high level of noise, quite satisfactory results were obtained in the recurrence of data from cycle to cycle. The average ELF “Zevs” signal relative to the natural electromagnetic field at frequencies of 125 and 166.6 Hz ranged from 5 to 11 dB. The relative differences in the horizontal impedance modulus at these frequencies between the morning and evening measurements did not exceed 2.1-2.6%.

Taking into account that the average value of the  $p_a$  deviations for earthquakes with a magnitude of 5-6 is 16-20% [Barsukov and Sorokin, 1973], it can be believed that the obtained results confirm the suitability of the “Zevs” source for geophysical monitoring.

In the circle of the earthquake prediction problems of interest for the MES, it is necessary to clearly formulate the sphere of the application of the “Zevs” source and its priority value compared to other methods applied in this field.

The seismic risk zones are usually located in the regions with a pronounced horizontal electrical inhomogeneity of the crust (in fault zones, shear and thrust slip zones, the contacts between various crustal blocks, and along fold geosyncline belts or island arc systems). Along with the variation in the overall resistivity of the crust in the source zone, the earthquake preparation is accompanied by variations in the relationship between the electrical inhomogeneity elements of the medium. For example, the compressive stresses are concentrated along a fault controlling the source zone position and, at the moment of their discharge (earthquake), are converted into shear stresses.

The fluid regime of the crust and, correspondingly, its electrical conductivity change during this conversion. Furthermore, the overall conductivity may change minimally, while the orientation of the electrical inhomogeneity axes may vary significantly due to the movement of fluids from the compressive zones to the extension ones. Finally, these variations must lead to the rotation of the total vectors of electric and magnetic fields through an angle. In this case, the decisive attraction can be given to the application of a controlled source with a given polarization direction of the original field. The phase measurements between the mutually orthogonal components of the same kind, i.e.,  $\Delta\phi E_x/E_y$  and  $\Delta\phi H_x/H_y$ , may be put in the forefront.

The physical-geological model for earthquake prediction in the ELF range can be based on the hypothesis that the major events preceding an earthquake proceed due to water coming into the fractures opening up before the earthquake in the fluid-saturated upper crust [Barsukov and Sorokin, 1973; Mogi, 1988]. The theory of earthquake precursors for this case is developed in the framework of the dilatance-diffusion model describing changes in the fluid regime of the uppermost crust (200-500 m) accessible for the ELF measurements even in rocks with a fairly high conductivity (30 100 Q m). In this case, the depth of the ELF sources remains sufficiently great to avoid the prevailing influence of the seasonal variations in rock conductivity.

#### Ecology.

A set of environmental problems is related to electromagnetic monitoring. Here, the field of the “Zevs” source may be used in searching for the monolithic crustal blocks suitable for the burial of radioactive waste and for aseismic building. The experience of works with the Khibiny MHD generator showed that these problems are most reliably solved in the field of a unified fixed source. In this case, it is possible to reveal the ancient monolithic and poorly conductive crustal blocks with their roots escaping in the protobasement strata and to distinguish them from the



relatively young and also poorly conductive dome-shaped granitoid blocks "floating" in the supracrustal substrate and, consequently, being more seismically dangerous.

#### **Wireless Communication.**

The problem of wireless communication is topical because it is necessary to transmit messages to deep galleries in the case of emergency situations, when all other communication means are disrupted. In this direction, the ELF antenna has certain advantages, since its frequency range enables us to reliably detect the emitted signals at great depths in the crust, up to 1 km and deeper, in the entire Karelia-Kola region. An exception is the case when the galleries are in strata of highly conductive rocks, for example, in sulfide-carboniferous schists or sedimentary rocks of clay type. These cases require preliminary study on the conditions for ELF signal propagation.

#### **Examination of the Barents Sea Shelf.**

The location of the "Zeus" ELF antenna near the Barents Sea shoreline allows us to propose a promising problem on using the radiated electromagnetic field in measuring the electrical conductivity of the bottom sediments in the Barents Sea shelf, with the purpose of predicting the oil-bearing fields in common with other geophysical methods. This problem needs a model for electromagnetic wave propagation in the sea bottom and for field energy scatter in sea water, described like the scatter in the ionospheric waveguide. The preliminary calculations intended to test this model showed that the optimum approach may be provided by measurements for the location of the receiving electrical antenna on the seafloor. In this case, a gain in the amplitude may reach two orders of magnitude, compared to the measurements on the sea surface. Moreover, the distance of detection may be up to several thousands of kilometers, under conditions of high-resistance bottom rocks, which provides the weak attenuation of the ELF field.

#### **Conclusion.**

Thus, the studies with the "Zeus" ELF radio transmitter open up wide possibilities for the further development of this system, including the creation of a multi-disciplinary installation capable of solving the forward communication problem along with problems of applied and basic geophysics, such as deep soundings, seismic prediction, and study of the wave properties of the ionosphere. A specific feature of the installation is the possibility of simultaneously solving various problems in various regions, following a synchronous and coordinated program of "Zeus" source starting. The profitability of the program directly depends on the number of users. However, the practical use of the source must be preceded by a prolonged stage of theoretical and experimental investigations, and this paper is only the very beginning of this process.

In conclusion, it should be noted that all of the studies on the creation of the "Zeus" installation were carried out by the Russian Institute for Power Radio Engineering, with the participation of a number of other institutions, of which a major role was played by the Institute of the Crust and the Institute of Radio Physics (Saint Petersburg University), as well as by the Nizhni Novgorod Institute of Radio Physics and the Research Institute of Direct Current, Geological Institute of the Kola Research Center, Russian Academy of Sciences.

#### **Acknowledgments**

We are grateful to M.I. Berdichevskii, A.K. Saraev, and L.A. Sobchakov for their valuable critical remarks. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 96-05-64387.

#### **References**

1. Akindinov, V.V., Naryshkin, V.I., and Ryazantsev, A.M., *Electromagnetic Fields in Sea Water: an Overview*, Radiotekh. Elektron., 1976, vol. XXI, issue 5, pp. 913-944.
2. Al'pert, Ya.L., *O rasprostraneniі elektromagnitnykh voln nizkoi chastoty nad zemnoi poverkhnosti (Propagation of Low-Frequency Electromagnetic Waves above the Earth's Surface)*, Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1955.
3. Ames, L.A., Frasier, G.V., and Orange, A.S., *Geological and Geophysical Consideration in Radio Propagation through the Earth's Crust*, IEEE Trans. Antennas and Propagat., 1963, vol. 3, no. 11.
4. Askerov, E.N., Bagdankis, N.I., Bagdasarova, N.Yu., Borisoglebskii, V.S., Bukreev, V.S., Zhukaev, Yu.V., Lisin, A.S., Koval'chuk, N.V., Kolesnik, V.E., Knyazev, V.N., Korenevskii, L.N., Odintsov, V.I., Perunov, B.S., and Useinov, S.Z., *Digital Measuring Station TsAIS, Geofiz. apparatus*, 1989, issue 91, pp. 3-12.
5. Astrakhantsev, G.V., Babakov, Yu.P., Bulashevich, Yu.P., et al., *Inductive Sounding of the Crust with the Use of an MHD Generator in the Urals*, Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Zemli, 1979, no. 1, pp. 78-90.
6. Barsukov, O.M. and Sorokin, O.N., *Variations in the Apparent Resistivity of Rocks in the Garm Seismic Zone*, Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Zemli, 1973, no. 1, pp. 100-102.
7. Bernstain, S.L., Barrouz, M., Evans, D.E., Griffiths, E.S., Macneil, D.A., Nissen, Ch.U., Richer, A., White, D.P., and Willim, D.K., *Distant Communication on Extremely Low Frequencies*, TIIER, Proceedings IEEE, 1974, vol. 62, pp. 5-30.
8. Blohm, E.K., Worzyk, P., and Scriba, H., *Goelectrical Deep Soundings in Southern Africa Using the Cabora Bassa Power Line*, J. Geophys., 1977, vol. 43, pp. 665-679.
9. Boerner, D.E. and West, G.F., *A Generalized Representation of the Electromagnetic Fields in the Layered Earth*, Geophys. J., 1989, vol. 97, no. 3, pp. 529-547.
10. Cagniard, L., *Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting*, Geophysics, 1953, vol. 18, no. 3, pp. 605-635.

11. Cantwell, T., Nelson, P., Webb, J., and Orange, A.S., Deep Resistivity Measurements in the Pacific, *J. Geophys. Res.*, 1965, vol. 70, no. 8, pp. 1931-1937.
12. Chave, A.D., On the Theory of Electromagnetic Induction in the Earth by Ocean Currents, *J. Geophys. Res.*, 1983, vol. 88, no. B4, pp. 3531-3542.
13. Galejs, J., ELF and VLF Fields of a Horizontal Electric Dipole, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1968, vol. AP-16, pp. 689-700.
14. Jones, A.G., Observations of the Electrical Asthenosphere beneath Scandinavia, *Tectonophysics*, 1982, no. 90, pp. 37-55.
15. Keller, V.G., Anderson, L.G., and Pritchard, Y.I., Geological Survey Investigation of the Crust and Upper Mantle, *Geophysics*, 1966, no. 6, pp. 1078-1087.
16. Kononov, Yu.M., Communication in the Navy, *Radio*, 1996, no. 10, pp. 10-11.
17. Korja, T., Electrical Conductivity of the Lithosphere, in *Magnetotelluric Studies in the Fennoscandian Shield, Finland*, Acta Univ. Ouluensis, 1990.
18. Kovtun, A.A., Moiseev, O.I., Vagin, S.A., Vardanyants, I.L., Kokvina, E.L., Savel'ev, A.A., and Uspenskii, N.I., MT and AMT Soundings on the Kola Peninsula and in Karelia, in *Glubinnaya elektroprovodnost' Baltiiskogo shchita* (Deep Electrical Conductivity of the Baltic Shield), Petrozavodsk: Karelia division, USSR Academy of Sciences, 1986, pp. 34-48.
19. Kraev, A.P., *Osnovy geoelektriki* (Basics of geoelectrics), Leningrad: Nauka, 1965.
20. Kraev, A.P., Semenov, A.S., and Tarkhov, A.G., Ultradeep Electrical Sounding, *Razvedka nedr*, 1947, no. 3, pp. 40-41.
21. Lundholm, R., The Experimental Sending of DC through the Earth in Sweden, *Proc. Int. Conf. Des Grands Reseaux Electriques a Haute Tension*, 1946, p. 134.
22. Makarov, G.I., Novikov, V.V., and Rybachek, S.T., *Rasprostranenie radiovoln v volnovodnom kanale "Zemlya-ionosfera"* (Propagation of Radio Waves in the Earth-Ionosphere Channel and the Ionosphere), Moscow: Nauka, 1993.
23. Mennier, J., Soutage electric de la crounte ferrestre util-isant les courants de retour industriels, *Compt. Rend.*, 1969, vol. 268, Ser. Act. B, no. 6, pp. 514-516.
24. Migaux, L., Astier, L., and Revol, P., Un essai de determination experimentalle de la resistivitee electrique des coces profondes de l'ecorce terrestre, *Ann. Geophys. (C.N.R.S.)*, 1960, vol. 16, no. 196.
25. Mogi, K., *Earthquake Prediction*, Tokyo: Academic, 1985. Translated under the title *Predskazanie zemletryasenii*, Moscow: Mir, 1988.
26. Samson, J.C., Deep Resistivity Measurements in the Fraser Valley, British Columbia, *Can. J. Earth Sci.*, 1969, vol. 6, no. 5, pp. 1129-1136.
27. Sapuzhak, Ya.S. and Enenshtein, B.S., The Use of Power Lines in Electromagnetic Soundings of the Earth, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1980, vol. 252, no. 4, pp. 838-841.
28. Saraev, A.K., Pertel', M.I., Parfent'ev, P.A., et al., Results of Experimental Studies on Electromagnetic Fields of an ELF Installation for Seismic Monitoring in the Northern Caucasus, *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Zakonomernosti evolyutsii zemnoi kory"* (International Conference on Regularities in the Crust's Evolution), Abstract of Papers, Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, 1997.
29. Shevtsov, A.N., Some Methods of Normalization and Transformation of Electromagnetic Sounding Results, in *Glubinnye geoelektricheskie issledovaniya s ispol'zovaniem promyshlennykh linii elektroperedach* (Deep Geoelectrical Studies with the Use of Industrial Power Lines), Apatity: Kola Research Center, USSR Academy of Sciences, 1990, pp. 90-95.
30. Shevtsov, A.N., Inversion of Frequency Soundings: Effective Regularization Method, *Materialy 9-i molod. nauchn. konf. (Proc. 9th Conf. of Young Scientists)*, Apatity: Kola Research Center, Russian Academy of Sciences, 1995, pp. 99-104.
31. Skopenko, N.F., *Geophysical Methods for the Estimation of a Nickel-Bearing Deposit in the Fedorov Tundry Area*, Cand. Sci. (Geol.-Min.) Dissertation, Leningrad: Funds of LGI, 1985.
32. Sochel'nikov, V.V., *Osnovy teorii estestvennogo elektromagnitnogo polya v more* (Basics of the Theory of a Natural Electromagnetic Field in the Sea), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979.
33. Tikhonov, A.N., Determination of Electrical Properties of Deep Layers in the Crust, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1950, vol. 73, no. 2, pp. 295-297.
34. Vanyan, L.L., *Elektromagnitnye zondirovaniya* (Electromagnetic Soundings), Moscow: Nauchnyi Mir, 1977.
35. Vanyan, L.L., Berdichevskii, M.N., Vasin, N.D., et al., On the Normal Geoelectrical Section, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Zemli*, 1980, no. 2, pp. 73-76.
36. Vanyan, L.L., Demidova, T.A., Palshin, N.A., Zhamalet-dinov, A.A., Kuksa, Vu.I., Kaikkonen, P., and Korja, T., Interpretation of Deep DC Soundings in the Baltic Shield, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, vol. 54, pp. 149-155.
37. Van Zijl, J.S.V., A Deep Schlumberger Sounding to Investigate the Electrical Structure of the Crust and Upper Mantle in South Africa, *Geophysics*, 1969, vol. 34, no. 3, pp. 450-462.
38. Van Zijl, J.S.V. and Joubert, S.J., A Crustal Geoelectrical Model for the South African Precambrian Granitic Terrain Based on Deep Schlumberger Soundings, *Geophysics*, 1975, vol. 40, pp. 657-663.

39. Velikhov, E.P. and Volkov, Yu.M., Prospects for Development of the MHD Energetics and Its Application in Geology and Geophysics, in *Glubinnye elektromagnitnye issledovaniya s primeneniem impul'snykh MGD generatorov* (Deep Electromagnetic Studies with the Use of Pulse MHD Generators), Apatity: Kola division, USSR Academy of Sciences, 1982, pp. 5-25.

40. Velikhov, E.P., Zhamaletdinov, A.A., and Zhdanov, M.S., Experiment "Khibiny," *Zemlya i Vselennaya* (The Earth and Universe), 1984, no. 5, pp. 12-18.

41. Velikhov, E.P., Zhamaletdinov, A.A., Sobchak, L.A., Veshev, A.V., Saraev, A.K., Tokarev, A.D., Shevtsov, A.N., Vasil'ev, A.V., Sonnikov, A.G., and Yakovlev, A.V., Experience of the Frequency Electromagnetic Sounding of the Crust with the Application of a Powerful ELF-Range Antenna, *Dokl. Akad. Nauk*, 1994, vol. 338, no. 1, pp. 106-109.

42. Veshev, A.V., *Elektroprofilirovanie na postoyannom i peremennom toke* (Electrical Alternating and Direct Current Profiling), Leningrad: Nedra, 1980.

43. Whate, D.R., *Goelektromagnetizm* (Goelectromagnetism), Moscow: Nedra, 1987.

44. Zhamaletdinov, A.A., Normal Geoelectrical Section of a Basement and Its Geothermal Interpretation Based on MHD Sounding Data for the Kola Peninsula, in *Glubinnye elektromagnitnye zondirovaniya s primeneniem impul'snykh MGD-generatorov* (Deep Electromagnetic Soundings with the Use of Pulse MHD Generators), Apatity: Kola Division, USSR Academy of Sciences, 1982, pp. 35-46.

45. Zhamaletdinov, A.A., *Model' elektroprovodnosti litosfery po rezul'tatam issledovaniya s kontroliruemymi istochnikami polya* (Baltiiskii shchit, Russkaya platforma) (An Electrical Model of the Lithosphere Based on Studies with Controlled Field Sources: the Baltic Shield and the Russian Platform), Leningrad: Nauka, 1990. 159 p.

46. Zhamaletdinov, A.A., Pavlovskii, V.I., Tokarev, A.D., and Kovalevskii, V.Ya., The "Volga" Experiment on the Deep Sounding with the 800-kV Volgograd-Donbass Power Line, in *Glubinnoe elektromagnitnoe zondirovanie s primeneniem promyshlennykh linii elektroperedach* (Deep Electromagnetic Sounding with the Use of Industrial Power Lines), Apatity, 1981, pp. 5-24.

---

---

**Ивочкин В.Г., Сараев А.К. Аппаратура электромагнитного профилирования с использованием техногенных полей ЛЭП различного назначения // Геофиз. аппаратура. 1998. вып. 101. с. 62-73. ISSN 0435-3374.**

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, [aks@AS1002.spb.edu](mailto:aks@AS1002.spb.edu)

Значительная перспективность использования техногенных полей частотой 50 Гц для электроразведки в течение длительного времени привлекает к данной проблеме многочисленных исследователей [2, 3, 4, 6, 8, 10]. По сравнению с методами, использующими собственные источники поля, эти работы дешевле и характеризуются более высокой производительностью. Среди методов без собственных источников использование электромагнитных полей сверхдлинноволновых радиостанций на частотах десятки килогерц не позволяет получать достаточно большую глубину исследований. Эффективному применению методов, использующих естественные электромагнитные поля с частотами от первых единиц до десятков герц, в промышленно развитых районах препятствует высокий уровень техногенных помех.

Для успешного использования полей ЛЭП частотой 50 Гц в электроразведке необходимо решить ряд методических и технических вопросов. Прежде всего, следует отметить, что в большинстве случаев электромагнитное поле в точке измерений формируется несколькими ЛЭП различной протяженности и ориентировки, различной конструкции и передаваемой мощности, причем последняя подвержена значительным колебаниям, несинхронным в различных ЛЭП. Даже в предельно простом случае единичной прямолинейной ЛЭП напряженность и характер изменения ее электромагнитного поля зависят от типа подвески проводов и соотношения силы токов различной последовательности [2, 6]. В результате в конкретной ситуации оказывается неизвестной функциональная связь измеряемых характеристик электромагнитного поля с параметрами геоэлектрического разреза, и по данным измерений не удается определить достоверные значения эффективного сопротивления  $\rho$ . [5]. Поэтому, для разработки методики электромагнитного профилирования на частоте 50 Гц и его применения необходимо иметь опорные достоверные данные о характеристиках геоэлектрического разреза, полученные на частоте, близкой к 50 Гц.

В качестве источника электромагнитного поля для этих целей может быть использована расположенная на севере Кольского п-ова сверхнизкочастотная радиоустановка (спец ЛЭП) [7]. Спец ЛЭП состоит из высокоомощного генератора гармонически изменяющегося тока и горизонтально расположенной и заземленной на концах антенны длиной около 60 км. Сила тока в антенне обычно изменяется в пределах 200-300 А и мощность радиоустановки достигает 2.5 МВт. Фиксированное положение и стабильный режим работы спец ЛЭП позволяет при ее использовании в качестве источника получать достоверные результаты. Поэтому при создании аппаратуры наряду с частотой 50 Гц было предусмотрено использование частоты 80 Гц. Это позволяет наряду с решением методических вопросов для работ на частоте 50 Гц проводить в Карело-Кольском регионе исследования методом электромагнитного профилирования с использованием спец ЛЭП на частоте 80 Гц. Учитывая то, что Карело-Кольский регион является достаточно промышленно освоенным, при разработке

аппаратуры были приняты меры по обеспечению защищенности измерений на частоте 80 Гц от влияния помех общепромышленной сети частотой 50 Гц.

Опыт аппаратурно-методических разработок электромагнитных методов показывает, что для изучения электромагнитных полей общепромышленных и спец ЛЭП перспективно определение вертикального импеданса - отношения касательных к поверхности Земли составляющих электрического  $E_T$  и магнитного  $H_T$  полей. Результаты измерений при этом не зависят от силы тока в источнике. Учитывая значительную нестабильность поля промышленной сети частотой 50 Гц, следует заметить, что использование одноканальной аппаратуры для поочередного во времени измерения электрического и магнитного поля малопригодно из-за значительных погрешностей таких измерений. В этой связи было предусмотрено двухканальное построение аппаратуры с непосредственным отсчетом отношения измеряемых сигналов.

При разработке было учтено общее требование к аппаратуре электромагнитного профилирования, состоящее в том, что она должна быть легкой, компактной и экономичной по питанию.

Разработанная аппаратура\* амплитудно-фазовых измерений промышленных полей (АФИПП-1) состоит из комплекта приемных антенн и двухканального микровольтметра-фазометра. Оба канала его идентичны и включают узлы, показанные на блок-схеме (рис. 1).

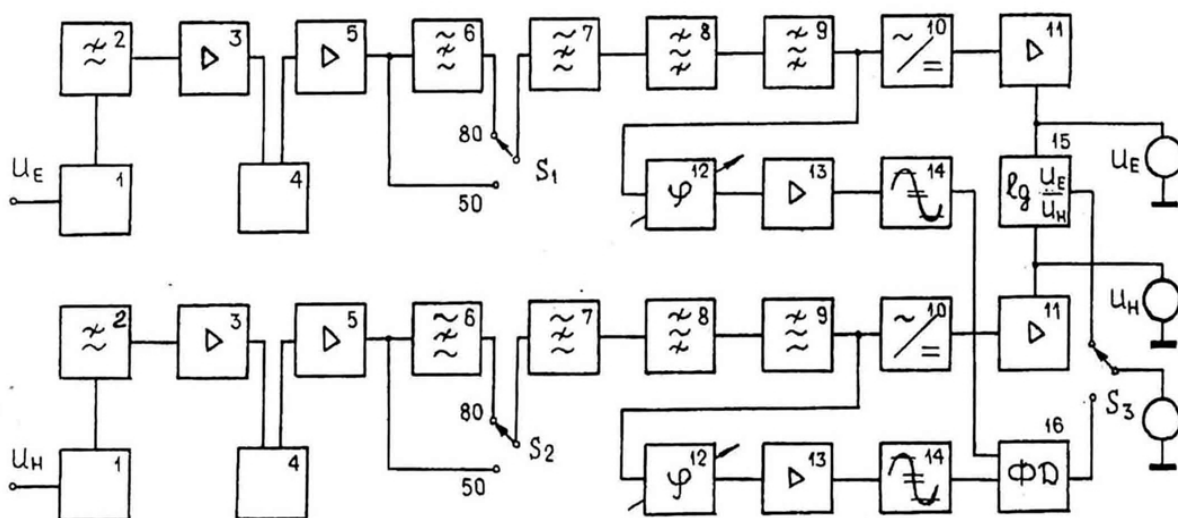


Рис. 1. Структурная схема микровольтметра-фазометра аппаратуры АФИПП-1.

1- аттенюаторы 0+40 дБ; 2 - фильтры нижних частот; 3, 5, 13 - широкополосные усилители; 4 - ступенчатые аттенюаторы 0+60 дБ; 6 - режекторные фильтры на 50 Гц; 7 - режекторные фильтры на 150 Гц; 8, 9 - селективные фильтры на 50 и 80 Гц; 10 - детекторные каскады; 11 - усилители постоянного тока; 12 - фазовращатели; 14 - усилители-ограничители; 15 - дифференциальный логарифматор; 16 - фазовый дискриминатор.

Сигналы электрической  $U_E$  и магнитной  $U_H$  антенн поступают на входные аттенюаторы 1, позволяющие в 100 раз (на 40 дБ) уменьшать чувствительность относительно номинальной. За ними следуют пассивные Z-C-фильтры нижних частот пятого порядка 2, предназначенные для подавления сигналов всех радиостанций включительно СДВ-диапазона. Частота среза (5 кГц) выбрана достаточно высокой для обеспечения минимальной крутизны фазово-частотной характеристики в интервале рабочих частот (этим уменьшается влияние изменений частоты сигнала на результаты фазовых измерений). Крутизна АЧХ составляет 26 дБ/окт., что обеспечивает подавление сигналов СДВ-радиостанций не менее чем в 40 раз. Через буферный каскад 3 ( $K_U=3$ ) сигнал поступает на ступенчатый (с шагом 10 дБ) аттенюатор с максимальным ослаблением 60 дБ и далее через усилитель 5 ( $K_U=13$ ) на блок режекторных фильтров первой (50 Гц) и третьей (150 Гц) гармоник общепромышленной сети (блоки режекторных фильтров включаются в положениях переключателей  $S_{1,2}$  «80» при измерениях с использованием спец ЛЭП).

Каждый фильтр (рис. 2а) состоит из двух звеньев частоты, настройки которых выше и ниже основной частоты режекции. Все звенья выполнены по одной принципиальной схеме (рис. 2б) и отличаются номиналами резисторов и конденсаторов [1].

\* Первый исследовательский макет аппаратуры с данным целевым назначением был разработан в НИИЗК ЛГУ В.Л. Бондаренко под руководством А.В. Яковлева.

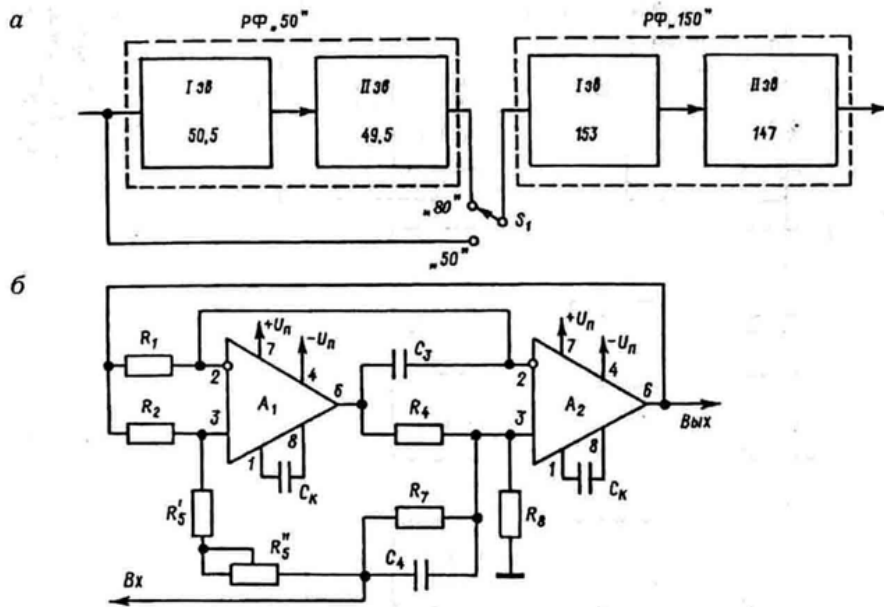


Рис. 2. Блок-схема режекторных фильтров (а) и принципиальная схема одного звена (б).

отличительным качеством которого является независимая регулировка частоты настройки, добротности (полосы пропускания) и коэффициента усиления, что обеспечивает чрезвычайную простоту процесса настройки. Звено 8 настраивается на частоты 79 или 49 Гц, а звено 9 - на 81 или 51 Гц; выбор частоты настройки осуществляется с помощью ключей на полевых транзисторах (на рис. 1 они не показаны).

Помимо обеспечиваемой этими звеньями АЧХ типа пары взаимно расстроенных резонансных контуров с фиксированной центральной частотой предусмотрена возможность получения АЧХ типа одиночного резонансного контура с плавной перестройкой в пределах  $80 \pm 1,5$  Гц; это осуществляется переменным резистором в звене 9 при одновременном отключении звена 8. Целесообразность плавной перестройки обусловлена особенностями режима работы спец ЛЭП. После фильтрации сигнал поступает на усилитель с плавной регулировкой усиления в пределах  $K=13 \div 22$  (на рис. 1 не показан) и затем разделяется на два параллельных подканала.

В первом амплитудном подканале осуществляется детектирование с пассивной фильтрацией LC-цепью ( $K = 2,5$ ) и усиление постоянной составляющей до уровня, достаточного для нормальной работы схемы определения десятичного логарифма отношения амплитуд двух сигналов (блок  $\lg(U_e/U_h)$ ) и регистрации на аналоговом самописце (в случае необходимости) типа Н 3020/5.

Второй подканал предназначен для выполнения фазовых измерений и состоит из плавного фазовращателя 12, широкополосного усилителя 13 ( $K_U = 5$ ) и двухстороннего усилителя-ограничителя 14 (формирователь

Амплитудно-частотная характеристика блока режекторных фильтров приведена на рис. 3а; участок 50 Гц в более наглядном масштабе изображен на рис. 3б. Из рисунка видно, что блок РФ обеспечивает подавление сетевой помехи и ее третьей гармоники в полосе частот соответственно  $50 \pm 1$  Гц и  $150 \pm 3$  Гц не менее чем в 100 раз (40 дБ). Фильтр вносит незначительное (примерно на 20%) уменьшение чувствительности, которое легко компенсируется в последующих узлах.

Селективный фильтр состоит из двух взаимно расстроенных относительно центральной частоты звеньев 8 и 9, выполненных по одинаковой принципиальной схеме активного RC-фильтра универсального типа [1],

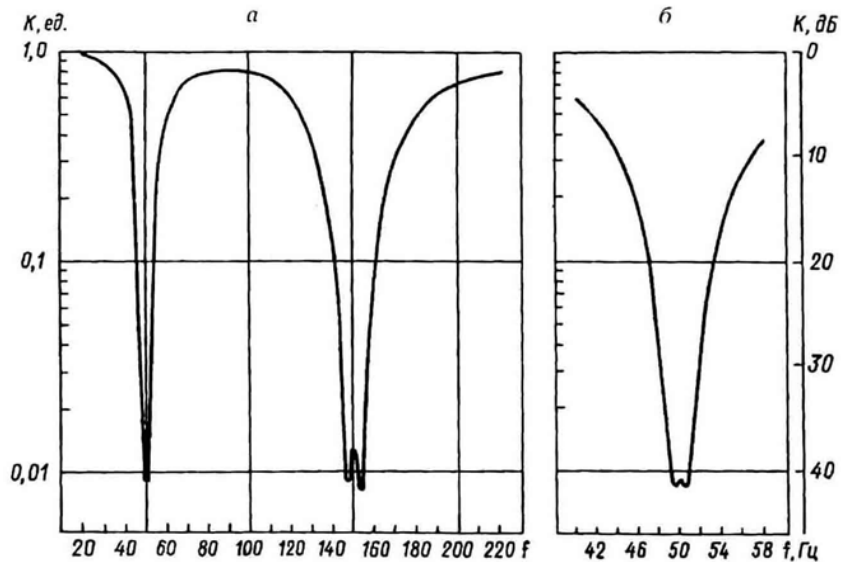


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика блока режекторных фильтров (а) и в более детальном масштабе ее 50-герцовый участок (б)

«меандра»). Сигналы фазовых подканалов поступают на фазовый детектор; постоянная составляющая его выходного напряжения, пропорциональная разности фаз входных сигналов, после усиления измеряется стрелочным индикатором. Через переключатель  $S_3$  последний также подключается к выходу схемы определения отношения амплитуд сигналов.

Питание всех блоков микровольтметра осуществляется от внутренних стабилизаторов напряжением  $\pm 9$  В. Напряжение используемых источников питания может колебаться в пределах  $\pm(10...15)$  В, потребляемый ток порядка 30 мА.

#### Основные технические характеристики микровольтметра-фазометра аппаратуры АФИПП-1

Уровень собственных шумов (с открытым входом), мкВ .....	0,1-0,15
Диапазон измеряемых сигналов при соотношении $U_c: U_{ш} > 10$ , мкВ .....	1-300
Диапазон измерений при большой амплитуде сигнала, мВ .....	0,1-30
Полоса пропускания по уровню 0,7 в режиме двухконтурной АЧХ, Гц .....	1,4
Диапазон изменения $U_E/U_H$ для шкалы блока аналогового определения	
Десятичного логарифма отношения измеряемых сигналов $\lg(U_E/U_H)$ , от 1/10 до 10	
Пределы измерения разности фаз сигналов, градусы	
-по первой шкале.....	-50...+50
-по второй шкале .....	-100...+100

Основной комплект датчиков измеряемых электромагнитных полей состоит из симметричной магнитной антенны с отводом от средней точки, сердечник которой выполнен из ферритовых колец марки М 2000 НМІ, и заземляемой на концах приемной линии размерами 10-20 м. Оба датчика подключаются к одинаковым симметричным согласующим блокам с высоким полным входным и низким выходным сопротивлением, смонтированным в компактных выносных корпусах и укрепленным на кожухе микровольтметра. Питание и выходные сигналы согласующих блоков передаются к последнему через короткие четырехпроводные экранированные кабели.

Магнитная антенна может использоваться в широкополосном (без настройки в резонанс) и резонансном режимах; в последнем случае она настраивается дискретно с помощью переключателя в согласующем блоке в полосе частот  $\pm 1,5$  Гц относительно номинальных значений и имеет максимальный коэффициент преобразования, равный 80 (В·м)/А для частоты спец ЛЭП.

В широкополосном режиме необходимая его величина (примерно 7,2 (В·м)/А) устанавливается коэффициентом усиления согласующего блока  $K_U = 20$ ). Для изучения полей с большей напряженностью  $K_U = 1$ .

Широкополосный режим является основным при фазовых измерениях, так как позволяет избежать ошибки за счет изменений частоты используемых источников.

Для оценки геологической информативности электромагнитного профилирования с аппаратурой АФИПП-1 на рабочей частоте спец ЛЭП и сопоставления получаемых материалов с результатами работ другими методами электроразведки были проведены опытно-методические исследования в Центрально-Кольском районе на массивах базит-гипербазитовых расслоенных интрузий Цагинской зоны и Панских тундр. В данном районе Северным филиалом госпредприятия ЭГГИ проводились работы комплексом сейсморазведки, электроразведки и магниторазведки с целью оценки перспектив интрузий на обнаружение сульфидного медно-никелевого и платинового оруденения.

Вместе с аппаратурой АФИПП-1 для электромагнитного профилирования нами используется аппаратура метода радиоэлектромагнитного профилирования (РЭМП) ИПИ-300 [11]. Комплекс этих двух методов с использованием рабочих частот спец ЛЭП (десятки герц) и СДВ-радиостанций (десятки килогерц) позволяет получать информацию на двух существенно различных уровнях глубинности (в среднем десятки и сотни метров - первые километры), что дает возможность производить объемное изучение геологического строения участков и повышает достоверность выделения глубинных объектов с пониженным удельным сопротивлением.

В рассматриваемых ниже примерах полевых работ измерения выполнялись в дальней зоне соответствующих источников (горизонтального кабеля конечной длины для спец ЛЭП и вертикального электрического диполя для СДВ-радиостанции  $f=16,4$  кГц). В этой зоне электромагнитное поле указанных источников может быть аппроксимировано плоской вертикально падающей волной и на границе раздела земля-воздух между горизонтальными составляющими электромагнитного и магнитного полей выполняется импедансное соотношение:

$$|Z| = \left| \frac{E_r}{H_\varphi} \right| = \sqrt{\omega \mu_0 \rho_-}$$

где  $E_r$  и  $H_\varphi$  - тангенциальные к поверхности Земли составляющие напряженности электрического и магнитного полей, соответственно В/м и А/м;  $Z$  — поверхностный импеданс, Ом;  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота

электромагнитного поля, Гц;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная проницаемость вакуума;  $\rho_-$  - эффективное удельное сопротивление неоднородной подстилающей среды, Ом·м.

Значения  $\rho_-$  при обработке результатов измерений с аппаратурой АФИПП-1 и ИПИ-300 вычисляются по формуле

$$\rho_- = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z|^2$$

На рис. 4 приведены графики эффективного сопротивления  $\rho_-$ , полученные с аппаратурой АФИПП-1 и методом РЭМП, а также результаты работ методом линейно-осевых зондирований (ЛОЭЗ) с аппаратурой ЭРА [9] по субширотному профилю 9105 на Цагинской зоне.

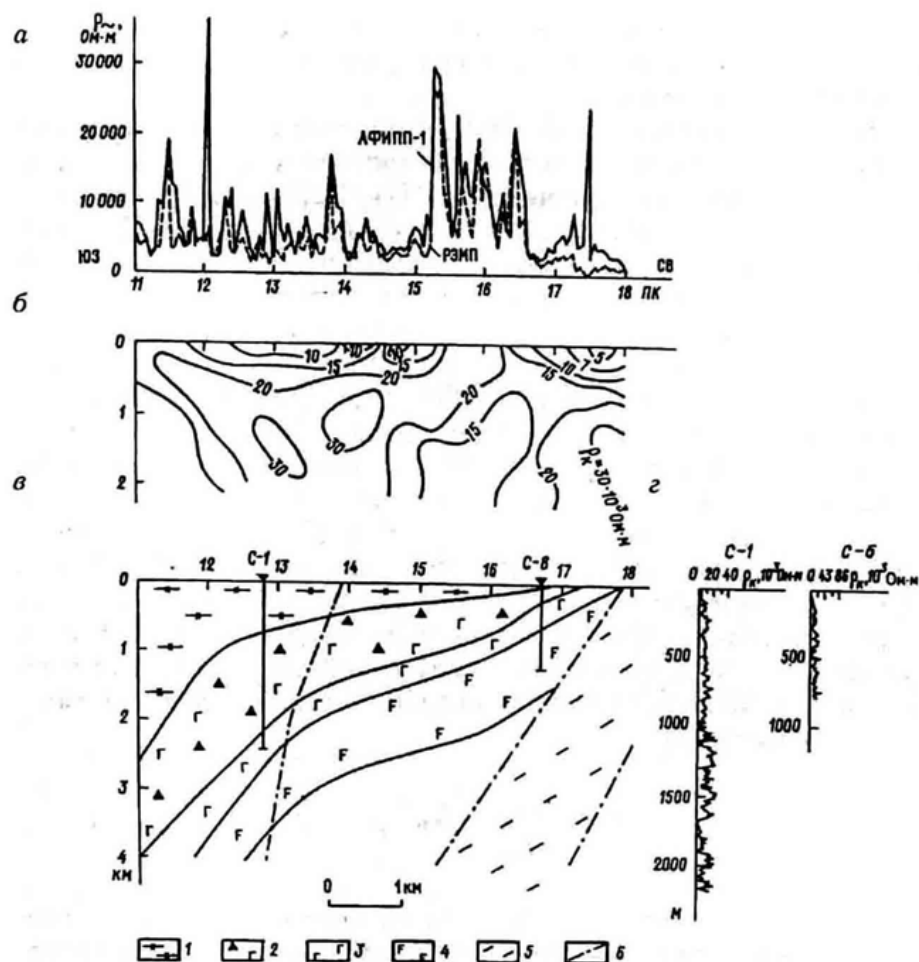


Рис. 4. Результаты электромагнитного профилирования на рабочей частоте спец ЛЭП (аппаратура АФИПП-1) и радиоэлектромагнитного профилирования РЭМП (аппаратура ИПИ-300,  $f = 16,4$  кГц) по профилю 9105 на Цагинской зоне (а), результаты работ ГП ЭГГИ методом ЛОЭЗ (б), сейсмогеологический разрез (в) и данные каротажа КС по скв. 1 и скв. 6 (г). 1 - кварцевые диориты; 2 - метагаббро; 3 - габбро-лабрадориты; 4 - габбро-нориты; 5 - гнейсы; 6 - разрывные нарушения.

Анализ характера графиков  $\rho_-$  показывает, что они в целом совпадают, за исключением интервала профиля между пикетами 17 и 18. Это свидетельствует о небольшом влиянии на результаты работ перекрывающих рыхлых отложений. Различия в значениях  $\rho_-$  в интервале пикетов 17 и 18 связаны, как показывает сопоставление с геоморфологией участка, с отложениями долины одной из рек.

Сравнение данных электромагнитного профилирования на рабочей частоте спец ЛЭП с результатами метода ЛОЭЗ также показывает на их общий характер. Блок повышенного удельного сопротивления, отмеченный на графике  $\rho_-$  между пикетами 15,2 и 16,7, выделяется также изолиниями  $\rho_k$  метода ЛОЭЗ. Пониженное значение  $\rho_-$  между пикетами 12,1 и 13,7, а также 14 и 15,2 соответствует пониженным величинам  $\rho_k$  в этих интервалах. Проводящие наносы в интервале пикетов 17 и 18, выделенные на графике  $\rho_-$ , также отмечены пониженными значениями  $\rho_k$ .

В целом характер графиков  $\rho_-$  свидетельствует о том, что разрез в рассматриваемом интервале профиля 9105 сложен достаточно высокоомными породами. Предпосылок для обнаружения глубинных проводящих зон с сульфидным медно-никелевым оруднением, приуроченным к нижней части расслоенной интрузии,

сложенной габбро-норитами, по данным электромагнитного профилирования на рабочей частоте спец ЛЭП не отмечается. Это подтверждается также результатами каротажа КС по скв. 1 и скв. 6 (рис. 4), пробуренным для уточнения строения расслоенной интрузии и возможного подсечения оруднения.

Возможности электромагнитного профилирования с аппаратурой АФИПП-1 также иллюстрируются результатами работ на Панских тундрах (рис. 5). Целью электроразведочных работ по данному профилю было картирование минерализованных зон пониженного удельного сопротивления, перспективных на платиновое оруднение. Из приведенных графиков  $\rho$ - видно, что уверенно выделяется зона чередования норитов и габбро-норитов между пикетами 30 и 40. причем эта зона картируется как методом РЭМП, так и электромагнитного профилирования на рабочей частоте спец ЛЭП. При движении в юго-западном направлении в сторону понижения рельефа из-за влияния проводящих наносов картировочные возможности метода РЭМП значительно уменьшаются, в то время как график  $\rho$ -, полученный с аппаратурой АФИПП-1, достаточно дифференцирован. Результаты, полученные с аппаратурой АФИПП-1, хорошо согласуются с данными бурения (отмечаются выделенные по данным бурения зоны между пикетами 30-40, а также 0-15). Кроме того, дополнительно выделена зона пониженных значений  $\rho$ - между пикетами 19-24 (уверенно по результатам измерений с аппаратурой АФИПП-1 и менее уверенно по результатам метода РЭМП).

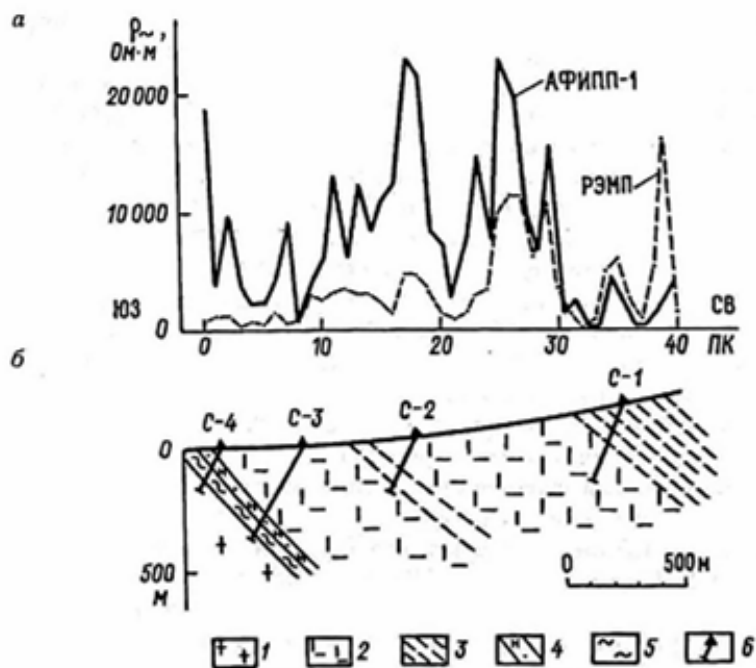


Рис. 5. Результаты электромагнитного профилирования на рабочей частоте спец ЛЭП (аппаратура АФИПП-1) и радиоэлектромагнитного профилирования РЭМП (аппаратура ИПИ-300.  $f = 16.4$  кГц) по профилю «Каменник» на Панских тундрах.  
 1 - щелочные граниты;  
 2 - габбро-нориты;  
 3 - чередование габбро-норитов и норитов;  
 4 - нориты меланократовые с сульфидной вкрапленностью;  
 5 - рассланцованные габбро-нориты контактной зоны;  
 б - скважины.

Погрешности, определенные по результатам повторных измерений с аппаратурой АФИПП-1 при проведении работ на Цагинской зоне и Панских тундрах, не превосходят 3%, что свидетельствует о достаточной надежности данных электромагнитного профилирования на рабочей частоте спец ЛЭП.

Таким образом, для амплитудно-фазовых измерений электромагнитных полей общепромышленных и специальной ЛЭП разработана полевая двухканальная аппаратура АФИПП-1, которая характеризуется высокой чувствительностью и помехозащищенностью. Для повышения точности предусмотрено непосредственное аналоговое определение отношения измеряемых сигналов. Аппаратура успешно опробована на объектах Центрально-Кольского района при изучении расслоенных интрузий Цагинской зоны и Панских тундр. Отмечена высокая информативность комплекса электромагнитного профилирования на рабочей частоте спец ЛЭП и радиоэлектромагнитного профилирования, позволяющего получать информацию на двух существенно различных уровнях глубинности (десятки и сотни метров — первые километры).

#### Список литературы

1. Активные избирательные устройства радиоаппаратуры / Под ред. В.В. Масленникова - М.: Радио и связь, 1987.
2. Алексеев Е.П., Бондаренко В.П., Яковлев А.В. Опыт использования электромагнитного поля эксплуатируемой высоковольтной ЛЭП для электроразведки // Глубинные геоэлектрические исследования с использованием промышленных линий электропередач. - Апатиты: КНЦ АН СССР, 1989 - С. 75-80.
3. Бобровников Н.В. ЛЭП как источник электромагнитного поля для электроразведки // Теория и практика индукционных и кондуктивных методов электроразведки - Свердловск: УрО АН СССР, 1990 - С. 110-116.
4. Вешев А.В., Яковлев А.В. Использование электромагнитных полей частотой 50 Гц для электроразведки // Геофизические методы поисков и разведки - Свердловск: СГИ, 1975- Вып.1 - С. 83-90.



5. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе - Л.: Недра. 1980 - 392 с.
6. Вешев А.В., Ерофеев А.В., Морозова О.М., Яковлев А.В. О возможностях использования электромагнитных полей высоковольтных ЛЭП для электроразведки // Глубинные геоэлектрические исследования с использованием промышленных линий электропередач - Апатиты: КНЦ АН СССР, 1988 - С. 64-75.
7. Использование высокомошной сверхнизкочастотной радиоустановки для глубинных электромагнитных исследований земной коры / Л.А.Собчаков, А.Г.Сонников, А.В.Васильев и др. // Международная научная конференция «Геофизика и современный мир» (Москва, 9-13 августа 1993 г.): Сб. Рефератов и докладов - М., 1993 - С. 26.
8. Карвелис Г.А. О возможности поисков хороших проводников по магнитному полю блуждающих токов частотой 50 Гц // Методы разведочной геофизики. Вопросы электроразведки рудных месторождений - Л.: НПО «Геофизика», 1977 - С. 90-95.
9. Нахабцев А.С. Низкочастотная электроразведка с линейными источниками гармонического поля - СПб.: Недра, 1992 - 359 с.
10. Орлов Г.В., Сарбаш В.Ф., Лемец В.Н. Возможности использования полей электрических промышленных помех в горнорудных районах Казахстана для геологического картирования // Разведочная геофизика СССР на рубеже 70-х годов - М.: Недра. 1975 - С. 216-221.
11. Парфентьев П.А., Пертель М.И. Измеритель поверхности импеданса на СДВ-СВ диапазон // Низкочастотный волновод «Земля — ионосфера» - Алма-Ата: Гылым. 1991 - С. 133-135.

***Fraser-Smith A. C.<sup>1</sup>, Bannister P. R.<sup>2</sup> Reception of ELF signals at antipodal distances.***

// Radio Sciences, 1998. V. 33, Issue 1. Pp. 83-88 (статья)

<sup>1</sup>STAR Laboratory, Stanford University, Stanford, CA 94305

<sup>2</sup>154 Nebraska Circle, Sebastian, Florida 32958

**Abstract**

Measurements of 82 Hz radio signals from a Russian ELF transmitter located on the Kola Peninsula are described. The measurements were made at several locations around the world, including Dunedin, New Zealand, and Arrival Heights, Antarctica, which are close to the antipodal point for the transmitter. This is the first time man-made ELF signals have been observed over such long distances and their clear reception makes possible a comparison of the theoretically predicted and measured amplitudes near the antipode. The agreement is excellent.

**Introduction**

During January 1990, CW radio transmissions at a frequency of 82 Hz were successfully received for many days at a number of the combined extremely-low and very-low frequency (ELF/VLF; frequencies in the range 5 Hz - 30 kHz) radio noise measurement systems operated around the world by Stanford University [Fraser-Smith et al., 1985, 1988; Fullekrug and Fraser-Smith, 1996]. Specifically, the transmissions were observed at Sondrestromfjord, Greenland (67° N, 51° W), Kochi, Japan (33° N, 227° W), Dunedin, New Zealand (46° S, 170° E), and Arrival Heights, Antarctica (78° S, 167° E); they could not be detected above the normal background noise at the Stanford University site in California (37° N, 122° W).

At the time of measurement of these ELF signals there was no available description of any ELF transmitting system operating at 82 Hz. This was surprising, since ELF transmitters for global communications are expensive to build and to operate and, by contrast, there was an extensive literature covering the development and deployment of the United States' WTF/MTF (Wisconsin Transmitter Facility/Michigan Transmitter Facility) dual antenna transmitting system, which typically operates at a center frequency of 76 Hz. Guided, however, by the comparatively large 82 Hz signal strength at Sondrestromfjord, and by the references to a Russian ELF transmitter in a novel by Tom Clancy [Clancy, 1990], who has a reputation for accuracy in regard to defense matters, we provisionally assumed that the source of the 82 Hz signals was in Russia, and that it was most probably located on the Kola Peninsula, which has the necessary very low electrical conductivity for operation of a ground-based ELF transmitter [Vagin et al., 1985]. The lack of detectable signals at Stanford, and some other details of the signal strengths, combined with practical considerations, suggested that the antenna was a long horizontal electric dipole (HED) antenna oriented in an approximate east-west (EW) direction.

We have since confirmed, from Russian sources [E. Tereshchenko, personal communication, 1996; Velikhov et al., 1996], that there is indeed a Russian ELF transmitter located on the Kola Peninsula, at a location (69° N, 33° E) near Murmansk in the northwest of the peninsula. As described by Velikhov et al., [1996], "the transmitter consists of two swept-frequency generators of sinusoidal voltage and two parallel horizontal grounded antennas, each about 60 km long. The generators provide 200 to 300 A currents in the antennas in the frequency range from 20 to 250 Hz." In the following, we will assume that the Russian ELF transmitter (hereafter referred to as the Kola Peninsula Transmitter Facility, or KPTF) is located on the Kola Peninsula at 69° N, 33° E, and that the azimuthal orientation (taken to be  $\varphi = 0^\circ$ ) of the long HED (or equivalent horizontal magnetic dipole (HMD) [Bannister, 1966]) is approximately 13° N of E

(77° E of N). The antipodal point for the KPTF is at 69° S, 213° E, which is located off the coast of the Antarctic in the north-eastern part of the Ross Sea, near Marie Byrd Land, and the great circle distances of this antipodal point from the Arrival Heights and Dunedin measurement sites are 1.7 Mm and 3.5 Mm, respectively.

It is remarkable to have measurements of man-made ELF signals over such long ranges, and particularly at antipodal distances (where a form of focusing of the signals is predicted theoretically), and they provide a unique opportunity to test the propagation theory for these ELF signals at large distances from their source for the first time. The purpose of this paper is to describe our comparison of the measured and theoretically-expected signal amplitudes and to show the excellent agreement between the two quantities.

### Analysis of the Measurements

The great circle distance ( $\rho$ ) from KPTF to Sondrestromfjord is close to 3.2 Mm, which, to two significant figure accuracy, is the same as the distance from the WTF/MTF combination to Sondrestromfjord. Given this fortuitously close agreement in range, it is significant that our measurements indicate that the normalized (to  $\varphi=0^\circ$ ) 82 Hz Sondrestromfjord field strength is 10 dB greater than the 76 Hz Sondrestromfjord WTF/MTF field strength. A similar 10 dB difference is also obtained when appropriate comparison is made between the 82 Hz field strength for the KPTF-to-Japan path (7.0 Mm) and the 76 Hz field strength for the WTF/MTF-to-Hawaii path (6.7 Mm). We will therefore assume that the 82 Hz KPTF magnetic dipole moment ( $M$ ) is 10 dB greater than the 76 Hz combined WTF/MTF magnetic dipole moment.

For an HMD antenna

$$M = ILW, \quad (1)$$

where  $M$  is the magnetic moment ( $\text{Am}^2$ ),  $L$  is the antenna length (m),  $I$  is the antenna current (A), and where  $W$  (m) is the effective vertical extent, or depth, of the antenna. For a single layer earth, with an electrical conductivity of  $\sigma_1$  and magnetic permeability  $\mu_0$ ,  $W$  is given by

$$W \approx \frac{1}{|\gamma_1|} - \frac{\delta_1}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

where  $\gamma_1$  is the propagation constant and  $\delta_1 = (2/\omega\sigma\mu_0)^{1/2}$  is the corresponding skin depth [Bannister, 1966]. If we assume there is a second layer of conductivity  $\sigma_2$  starting at a depth of  $h_1$  beneath the first, and that  $\sigma_1 \ll \sigma_2$  and  $\tanh \gamma_1 h_1 \sim \gamma_1 h_1$ , we have

$$W \approx h_1 \quad (3)$$

The average effective conductivity of the earth beneath the WTF/MTF antennas is approximately  $2.4 \cdot 10^{-4}$  S/m [Bannister, 1976; Wolkoff and Kraimer, 1993], which gives an effective depth of  $W \sim 2.6$  km at a frequency of 76 Hz. For the very low conductivity Kola Peninsula area, there is a first layer with a conductivity of approximately  $10^{-5}$  S/m down to a depth ( $h_1$ ) of approximately 10 km, beneath which there is a second layer with a conductivity of approximately  $10^{-3}$  S/m [Vagin et al., 1985]. Thus condition (3) applies and  $W \sim 10$  km, which is approximately four times greater than the value of  $W$  for the WTF/MTF antenna combination.

For the combined WTF/MTF antennas, operating at 76 Hz, we have

$$M \approx 2 \times 300 \text{ (A)} \times 22.5 \text{ (km)} \times 2.6 \text{ (km)} = 3.51 \times 10^4 \text{ (Akm}^2\text{)} \quad (4)$$

Since the magnetic moment for the KPTF is approximately 10 dB greater than that of the WTF/MTF combination, it must equal  $1.1 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{km}^2$ . For an antenna length of 55 km, the required current  $I$  is 200 A. That is, at 82 Hz:

$$M \approx 200 \text{ (A)} \times 55 \text{ (km)} \times 10 \text{ (km)} = 1.1 \times 10^5 \text{ (A km}^2\text{)} \quad (5)$$

Fig. 1 shows a plot of the variation with frequency (in the range 0-400 Hz) of the measured ELF magnetic field strength at Sondrestromfjord for January 1990, during the times when the 82 Hz signal was present. The effective integration time is 1185 minutes (the number of the 2 one-minute samples/hour recorded during January that contained 82 Hz transmissions). The total number of possible one-minute samples is 1488, so transmissions were detected 80% of the time. The plot clearly shows the first seven Schumann resonances, the 50 and 60 Hz power line frequencies (and their related harmonics), and the spectral peak corresponding to the 82 Hz transmissions.

The January 1990 82 Hz field strengths measured at Sondrestromfjord, Dunedin, and Arrival Heights (and estimated at Stanford) are presented in Table 1. Also listed are the 1985-1994 January 80 Hz median atmospheric noise values measured in dB  $H_T$  ( $H_T$  is the total horizontal magnetic field noise level; the unit of  $H_T$  is dB with respect to the reference quantity of one ampere per meter in a 1Hz bandwidth), and the signal-to-noise ratios (SNR's) for both a 1Hz bandwidth (BW) and for a 2 minute integration time (IT). Note that the measured Sondrestromfjord 2-minute

integration time SNR is 25 dB, which corresponds to an easily measured signal. On the other hand, the estimated Stanford 2-minute integration time SNR is < 1.5 dB, which is undetectable.

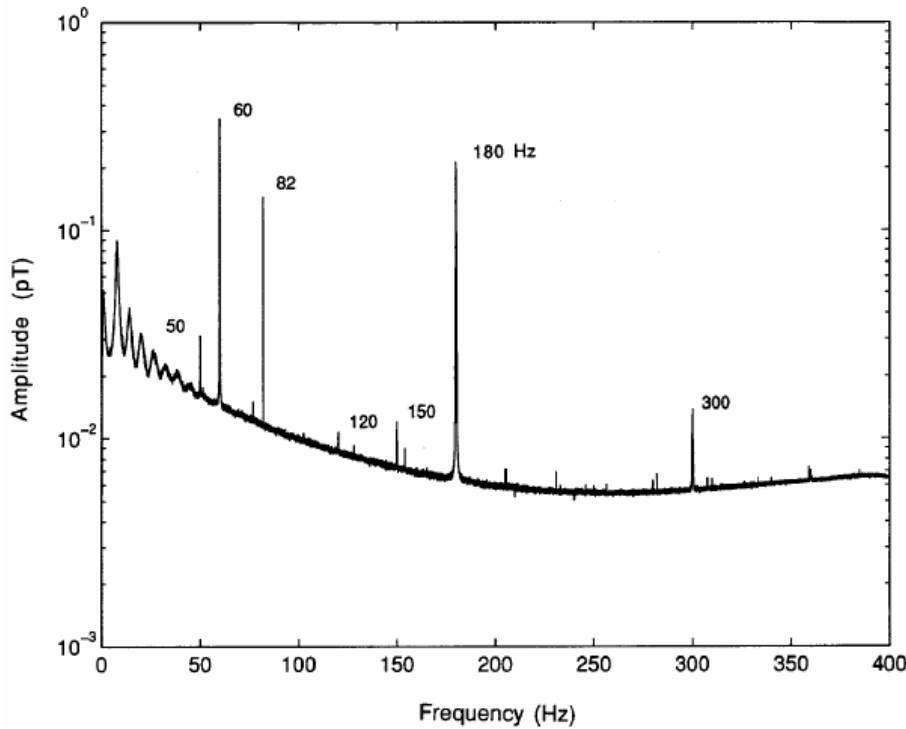


Fig. 1. Average amplitude spectrum of the lower-ELF radio noise at Sondre-stromfjord, Greenland, during January, 1990. The average spectrum is computed from the 1185 one-minute synoptic recordings taken twice per hour that contained 82 Hz transmissions; the overall total possible number of these one-minute recordings during January is 1488.

**Table 1**

The 82 Hz field strengths measured at Sondrestromfjord, Dunedin, and Arrival Heights during January 1990. The estimated field strength at Stanford is also shown.

Location	KPFT Range (Mm)	Median Noise Jan 80 Hz (dB $H_T$ )	Measured $H_\phi$ (dBA/m)	SNR 1 Hz BW (dB)	SNR 2 min. IT (dB)
Sondrestromfjord	3.2	-139.7	-135.6	+4.1	24.9
Dunedin	16.5	-134.7	-142.5	-7.8	13.0
Arrival Heights	18.3	-140.5	-151.9	-11.4	9.4
Stanford	8.1	-136.4	$\leq 155.7^*$	$\leq 19.3^*$	$\leq 1.5^*$

\*estimated

The receiving antennas at the Stanford University ELF/VLF measurement locations are normally installed as perpendicular pairs, with one antenna oriented in the magnetic NS direction and the other otherwise identical antenna oriented in the magnetic EW direction, and it is the signals received on the magnetic NS aligned antennas that were employed in this analysis. Since the magnetic NS direction is different from the great circle path direction from KPTF to these sites, a receiving antenna correction factor must be employed. The correction factors varied from 0 dB at Sondrestromfjord to 6.5 dB at Arrival Heights. Also, since these sites are off axis to the KPTF antenna (i.e.,  $\phi=0^\circ$ ), a transmitting antenna correction factor must also be employed. These transmitting antenna correction factors vary from 2.0 dB at Dunedin to 8.6 dB at Arrival Heights.

Presented in Table 2 are the measured and normalized (to  $\phi=0^\circ$ ) field strengths at each of the three sites. From this table, we see that the normalized 82 Hz field strengths are -131.8, -139.0, and -136.8 dBA/m, at Sondrestromfjord, Dunedin, and Arrival Heights, respectively.

Following Bannister [1975, 1993, 1996], the 76 Hz magnetic field strength produced at distances in the range 1 to 19 Mm by the WTF/MTF combination in an omnidirectional mode (i.e., independent of  $\phi$ ) may be expressed as

$$20 \log H_\phi \approx -131.8 + 20 \log E - \alpha \phi - 10 \log(a \sin \rho/a), \text{ dBA/m} \quad (6)$$

where  $E$  is the excitation factor,  $\alpha$  is the attenuation rate (measured in dB/Mm),  $\rho$  is the great circle distance (measured in Mm), and  $a$  is the radius of the earth (6.370 Mm).  $E$  is defined as:

$$E = \frac{55.90}{h\sqrt{c/v}}, \quad km^{-1} \quad (7)$$

where  $h$  is the ionospheric reflection height in km, and  $c/v$  is the earth-ionosphere waveguide phase velocity ratio.

**Table2**

Measured and normalized (to  $\varphi = 0^\circ$ ) field strengths at the three Stanford measurement sites. The receiving antenna (RA) and transmitting antenna (TA) correction factors are listed for each site.

Location	Measured $H_\varphi$ (pT)	Measured $H_\varphi$ (dBA/m)	KPFT Range (Mm)	Correction Factor, RA (dB)	Correction Factor, TA (dB)	$H_\varphi$ ( $\varphi = 0^\circ$ ) (dBA/m)
Sondrestromfjord	0.208	-135.6	3.2	0.0	3.8	-131.8
Dunedin	0.0943	-142.5	16.5	1.5	2.0	-139.0
Arrival Heights	0.0319	-151.9	18.3	6.5	8.6	-136.8

We have shown that the 82 Hz KPTF field strength is 10 dB greater than that of the 76 Hz WTF/MTF combination in an omnidirectional mode. As a result, the 82 Hz magnetic field strength produced by the KPTF for distances in the range 1 to 19 Mm may be expressed as

$$20 \log H_\varphi \approx -121.8 + 20 \log E - \alpha \rho - 10 \log(a \sin \rho/a) + 20 \log \cos \varphi, \quad \text{dBA/m} \quad (8)$$

At the antipode ( $\rho = 20$  Mm), the spreading loss factor ( $-10 \log(a \sin \rho/a)$ ) is replaced by  $+10 \log(\pi^2 (c/v)/\lambda)$  [Galejs, 1972; Burrows, 1978], where  $\lambda$  is the free space wavelength in Mm. For frequencies of 76 to 82 Hz and  $c/v \sim 1.09$  (nighttime propagation), the antipodal spreading loss (which is actually a focusing gain) varies in the range +4.3 to +4.7 dB.

Utilizing eqn (8) and comparing the Sondrestromfjord (Dunedin and Sondrestromfjord) Arrival Heights field strengths (Table 2) results in an attenuation rate of 0.5 dB/Mm and excitation factor of 0.65 (-3.7 dB) for the KPTF signals. These are clearly nighttime values of  $\alpha$  and  $E$ , since typical daytime values of  $\alpha$  and  $E$  are 1.3 dB/Mm and 0.91 (-0.8 dB), respectively [Bannister, 1993, 1996].

This comparison indicates that the nighttime 82 Hz field strengths at antipodal distances (15 to 20 Mm) will be substantially greater than the daytime field strengths. For example, at a range of 17.5 Mm, the nighttime field strength will be  $(17.5(1.3 - 0.5) - 3.7 + 0.8) = 11.1$  dB greater than the daytime field strength.

The average 76 Hz nighttime attenuation rate ( $\alpha_N$ ) measured over various paths (with lengths in the range 1.5 to 11.5 Mm) is  $\sim 1.0$  dB/Mm [Bannister, 1985, 1993, 1996]. However, during January,  $\alpha_N \sim 0.6$  dB/Mm for the WTF/MTF to Hawaii path. Because of the effect of earth's magnetic field, we would expect the attenuation rate for this predominantly EW path to be greater than the attenuation in the WE or NS directions (such as KPTF-to-Dunedin and KPTF-to-Arrival Heights paths). Thus, a nighttime attenuation rate value of 0.5 dB/Mm is reasonable for the given time of year. (An exponential ionospheric conductivity profile with  $\beta = 0.55 \text{ km}^{-1}$  and  $H = 95$  km, as was used by Wait and Spies [1964], yields  $\alpha \sim 0.5$  dB/Mm). On the other hand, if the measurements were taken in the March/April time period, the nighttime attenuation rate would be  $\sim 1$  dB/Mm [Bannister, 1993, 1997].

Shown in Figure 2 are the predicted KPTF 82 Hz field strengths versus range for both all-daytime and all-nighttime propagation paths. The azimuthal angle  $\varphi$  is assumed to be  $0^\circ$ . The nighttime and daytime attenuation rates are assumed to be 0.5 and 1.3 dB/Mm, respectively, while the nighttime and daytime values of  $E$  are assumed to be -3.7 dB and -0.8 dB, respectively. Also plotted in the figure are the normalized (to  $\varphi = 0^\circ$ ) Sondrestromfjord, Dunedin, and Arrival Heights measured field strengths. Note the excellent agreement between the predicted and measured values at all three sites. For further comparison, we have also plotted the 76 Hz field strengths for January as measured in Connecticut, King's Bay (Georgia), and Hawaii [Bannister, 1997]. 10 dB has been added to the measured values to adjust for the difference in transmitter strengths and the distances are measured from the WTF/MTF midpoint. Again, the agreement is excellent. (The Hawaii measured nighttime field strength is 0.7 dB low, but this is because the nighttime attenuation rate in this EW direction is 0.1 dB/Mm greater than in the WE/NS directions).

Field strengths of the 82 Hz signal for mixed day/night paths were also measured at Kochi, Japan (7 Mm range) during January through March, 1990. As we have already noted, the normalized field strengths were almost identical to the 76 Hz field strengths (with 10 dB added) for the Hawaii mixed day/night path (6.7 Mm range) for the same three month interval.

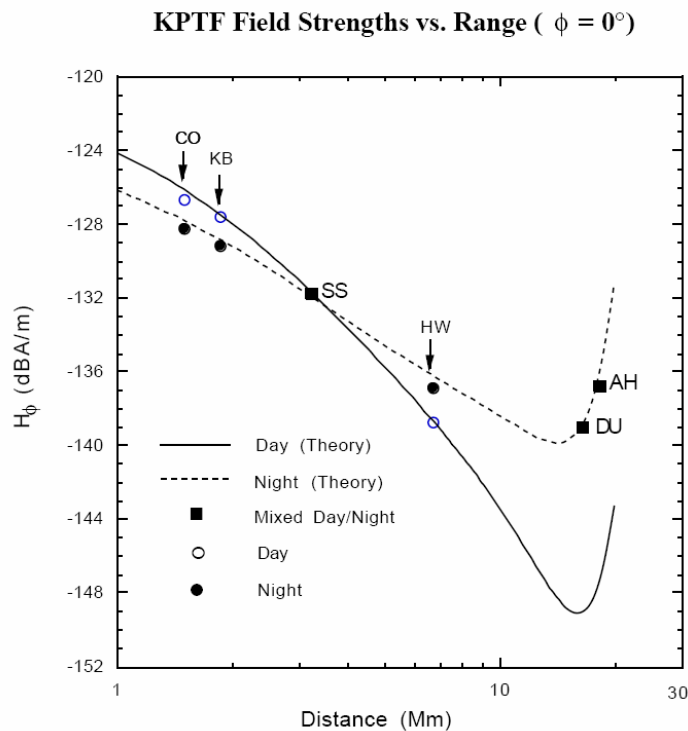


Fig. 2. Curves showing measured and predicted values of the KPTF 82 Hz field strengths. The two curves show theoretically-predicted values for all-day and all-night paths over global ranges and the measured field strengths at Søndrestromfjord (SS), Dunedin (DU), and Arrival Heights (AH) are shown as three labelled points. January WTF/MTF 76 Hz field strengths in Connecticut (CO), Hawaii (HW), and at King's Bay, Georgia (KB) are also shown for comparison.

### Conclusion

During January 1990, 82 Hz CW transmissions were successfully received for many days at a number of ELF/VLF radio noise measurement sites operated by Stanford University around the world. The source of these transmissions was undoubtedly the Russian ELF transmitter (KPTF) located in the Kola Peninsula, which is about 10 dB more powerful than the U.S. 76 Hz dual transmitting system (WTF/MTF).

It is particularly interesting that the 82 Hz signals could be clearly measured at Dunedin, New Zealand, and Arrival Heights, Antarctica, which are close to the antipodal point of the KPTF. This is the first time that man-made ELF signals have been received over such long distances. Reception of the signals made possible a comparison of the theoretically-expected and measured signal amplitudes near the antipode and the agreement is excellent, as it is at all of the measurement sites.

Additional comparison of the 82 Hz KPTF and 76 Hz WTF/MTF signal strengths (with the 76 Hz strengths adjusted to compensate for their 10 dB weaker transmitter) measured at different sites and times yields almost identical values of ELF attenuation rates and excitation factors.

### Acknowledgments

We thank Dr. Evgeny Tereshchenko of the Polar Geophysical Institute (Kola Science Center RAN) for helpful information. This work was supported in part by the Office of Naval Research through Grant No. N00014-92-J-1576, and logistics support was provided by the National Science Foundation through NSF cooperative agreement ATM 88-22560 (Sondrestromfjord) and NSF Grant 088-9119552 (Arrival Heights).

### References

- Bannister, P. R., "Quasi-static fields of dipole antennas at the earth's surface," *Radio Science*, 1, 1321-1330, 1966.
- Bannister, P. R., "Variations in extremely low frequency propagation parameters," *J. Atmos. Terr. Phys.*, 37, 1203-1210, 1975.
- Bannister, P. R., "Summary of the Wisconsin Test Facility effective earth conductivity measurements," *Radio Sci.*, 11, 405-411, 1976.
- Bannister, P. R., "The determination of representative ionospheric conductivity parameters for ELF propagation in the earth-ionosphere waveguide," *Radio Sci.*, 20, 977-984, 1985.
- Bannister, P. R., "ELF propagation highlights," *AGARD Conference Proceedings* 529, 2-12-15, 1993.

- Bannister, P. R., "Further examples of seasonal variations of ELF propagation parameters," (in preparation), 1997.
- Burrows, M. L., ELF Communications Antennas, Peter Peregrinus, Stevenage, England, 1978.
- Clancy, T., The Hunt for Red October, Berkley Books, N.Y., 1990.
- Fraser-Smith, A. C., and R. A. Helliwell, "The Stanford University ELF/VLF radiometer project: Measurement of the global distribution of ELF/VLF electromagnetic noise," Proc. 1985 IEEE Internat. Symp. on Electromag. Compatability, IEEE Catalog No. 85CH2116-2, 305-311, August 1985.
- Fraser-Smith, A. C., R. A. Helliwell, B. R. Fortnam, P. R. McGill, and C. C. Teague, "A New Global Survey of ELF/VLF Radio Noise," Conf. on Effects of Electromagnetic Noise and Interference on Performance of Military Radio Communication Systems, Lisbon, Portugal, 26-30 October, 1987, published in AGARD Conference Proceedings No. 420, pp. 4A-1-4A-9, December 1988.
- Fiillekrug, M., and A. C. Fraser-Smith, "Further evidence for a global correlation of the Earth-ionosphere cavity resonances," Geophys. Res. Letts., 23, 2773-2776, 1996.
- Galejs, J., Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves, Pergamon Press, N.Y., 1972.
- Vagin, S. A., Vardanyants, I. L., A. A. Kovtun, E. L. Kokvina, O. N. Moiseyev, A. A. Savel'yev, and N. I. Uspenskiy, "Magnetotelluric sounding in the  $10^3$  to  $10^4$  second period interval in the Murmansk block of the Kola Peninsula and in Central Karelia," Izvestia, Earth Physics, 21, 444-450, 1985.
- Velikhov, E. P., A. A. Zhamaletdinov, L. A. Sobchakov, A. V. Veshev, A. K. Sarayev, A. D. Tokarev, A. N. Shevtsov, A. V. Vasil'yev, A. G. Sonnikov, and A. V. Yakovlev, "Extra-low frequency sounding of the Earth's crust with a high-power antenna," Trans. Russian Acad. Sciences (Doklady), 341, 12-16, 1996.
- Wait, J. R., and K. P. Spies, "Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves," NBS Tech. Note 300, 1964.
- Wolkoff, E. A., and W. A. Kraimer, "Pattern measurements of U.S. Navy ELF transmitters," AGARD Conf. Proc., 529, 26-1-26-10, 1993.

=====

***Belyaev P.P.<sup>1</sup>, Polyakov S.V.<sup>1</sup>, Ermakova E.N.<sup>1</sup>, Isaev S.V.<sup>1</sup>, Yakunin M.N.<sup>1</sup>, Sobchakov L.A.<sup>2</sup>, Vasilyev A.V.<sup>2</sup>, Astakhova N.L.<sup>2</sup>, Vladimirov D.N.<sup>2</sup>, Volosevich V.S.<sup>2</sup>, Protopopov L.N.<sup>2</sup>, Gordyushkin S.M.<sup>2</sup>, Savitsky A.P.<sup>3</sup>, Red'ko G.V.<sup>3</sup>, Eliseev A.A.<sup>3</sup>, Fedorov A.B.<sup>3</sup>, Ratnikov K.D.<sup>3</sup>***  
**(2002) First experiments on generating and receiving artificial ULF (0.3-12 Hz) emissions at a distance of 1500 km. // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 45, No. 2, 2002. Translated from Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Radiofizika, Vol. 45, No. 2, pp. 151-162, February, 2002. Original article submitted October 16, 2001.**

<sup>1</sup> Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia, <sup>2</sup> Russian Institute of Powerful Radio Con

<sup>2</sup> Russian Institute of Powerful Radio Construction, St. Petersburg, Russia,

<sup>3</sup> A. A. Logachev All-Russian Research Institute of Exploratory Geology, St. Petersburg, Russia.

We present first results on generation and reception of an artificial ULF signal at distances of 800 and 1500 km in the frequency range 0.3-12 Hz. The high-sensitivity receiving equipment and a stable current in the antenna exciting the ULF field in the Earth-ionosphere cavity allowed us to detect the signal with high accuracy. It was found that the amplitude-frequency dependences and the polarization of an artificial signal are strongly different in the daytime and at night, which is related to the influence of the near-Earth waveguide and resonance structures on the detected signal. We calculate the signal amplitude for different models of the ionosphere. It is shown that the model of an anisotropic, vertically inhomogeneous ionosphere describes adequately the amplitude-frequency dependences of the measured ULF signal. We calculate the apparent resistance of the underlying surface at the reception point using two measured orthogonal components  $H_x$  and  $E_y$  of an electromagnetic field. It is shown that the calculation accuracy of the apparent resistance obtained using a controlled ULF source exceeds significantly the accuracy achieved using natural electromagnetic fields.

### 1. Introduction

The ultra low frequency range (ULF, 0.3-30 Hz) differs radically from the higher-frequency extremely low frequency (ELF) range which is widely used at present. The differences are in the great variety of the near-Earth paths of signal propagation to the reception point, factors that influence the electromagnetic field and the types of noise sources. The sensitivity of ULF signals to the state of the near-Earth environment makes this band very advantageous for studying ionosphere-magnetosphere structures and nonlinear processes of interactions between waves and heavy particles. Moreover, a large skin depth of the ULF field in natural conductive media facilitates its use for developing deep-sounding techniques. Development of high-precision satellite navigation systems, allowing one to synchronize time at the emission and reception points, makes it possible to develop novel multifrequency tomographic systems for electromagnetic sounding of the underlying medium.

In September 1993, the Russian Institute of Powerful Radio Construction (RIPRC) and the Radio-physical Research Institute (RRI) performed the first experiment on generation and reception of ULF signals at a distance of

1500 km using a radio transmitter located at Kola Peninsula. This facility is described in detail in [1, 2] where the results of experiments on ELF sounding of the Earth crust are discussed. In May to October 1998, new experimental studies on generation of ULF fields were performed on a new ground-based facility of moderate power, also located at Kola Peninsula. In this paper, we present the results of measurements of artificial ULF signals in the experiments of 1993 and 1998 and compare the experimental data with the calculations of the amplitude-frequency response and the polarization of the received ULF signals for different models of the ionosphere.

## 2. Description of the transmitting and receiving equipment

In September 18 and 19, 1993, the RIPRC and the RRI conducted the first unique experiment on generation and reception of electromagnetic ULF fields at a distance of 1500 km. The goals of the experiment were testing the ULF transmitter, the reception unit, and conditions of signal generation and propagation along the Earth's surface. We used the radio transmitter located at Kola Peninsula with the antenna in the form of an electric power line about 60 km in length, grounded at both ends. An important feature of this antenna is that it is located on the surface of a homogeneous tectonic plate of very low conductivity ( $\sigma = 5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4} \text{ S m}^{-1}$ ). The line was excited by sinusoidal current with an amplitude of 120-150 A. The reception was performed at the RRI observation site located about 120 km from Nizhny Novgorod. The measurement equipment of the site is as follows [3]:

- 1) a basic two-component inductive magnetometer with sensitivity  $0.05 \text{ pT Hz}^{-1/2}$  at a frequency of 1 Hz for measuring the meridional ( $H_{N-S}$ ) and latitudinal ( $H_{E-W}$ ) magnetic-field components;
- 2) a shielded loop with a radius of 250 m and the number of turns  $n = 18$ , placed at a depth under the ground for measuring the vertical magnetic-field component  $H_z$ ;
- 3) an orthogonal symmetric earth-current facility with two arms of length  $l = 75 \text{ m}$  each and the Pb electrodes placed at a depth of 2.5 m for measuring the meridional ( $E_{N-S}$ ) and latitudinal ( $E_{E-W}$ ) electric-field components;
- 4) a capacitance-type sensor for measuring the vertical electric-field component  $E_z$ ;
- 5) a set of loop antennas for measuring the  $H_{N-S}$  and  $H_{E-W}$  components in the ELF/VLF ranges;
- 6) a portable two-component induction magnetometer with sensitivity  $0.1 \text{ pT Hz}^{-1/2}$  at a frequency of 1 Hz;
- 7) an SK4-72 multichannel complex of the analog-to-digital (A-D) processing and recording equipment.

In 1993, the schedule of experiments was as follows:

Cycle 1: 10:00{12:00 MSK, September 18, 1993;

Cycle 2: 22:00{24:00 MSK, September 18, 1993;

Cycle 3: 02:00{04:00 MSK, September 19, 1993.

In each two-hour cycle, the transmission was performed during 20 min intervals separated by 10 min pauses. The radiation frequency  $f$  was chosen for each interval as follows (time is reckoned from the beginning of the corresponding cycle):

00:00-00:20	$f = 5.2 \text{ Hz}$ ;
00:30-00:50	$f = 2.6 \text{ Hz}$ ;
01:00-01:20	$f = 1.3 \text{ Hz}$ ;
01:30-01:50	$f = 0.32 \text{ Hz}$ .

After the successful experiment in 1993 on generation and reception of ULF signals at large distances, the Russian Institute for Powerful Radio Construction, the Radiophysical Research Institute, and the Institute of Exploratory Geology "Rudgeofizika" (VIRG-Rudgeofizika) built a mobile geophysical ULF facility located at Kola Peninsula (see Fig. 1). The facility comprises an ULF/ELF generator, a matching unit, an antenna, and a testing and measuring complex. A 108-km grounded electric power line aligned in the East-Western direction serves as an antenna. A portable 50-kW generator directly transforms a three-phase 50-Hz signal with a voltage of 380 V into a signal at frequency ranging from 0.1 to 15 Hz, which was fed to the antenna input. The frequency of the radiated signal was set by a standard G-110 oscillator which ensured signal accumulation at the

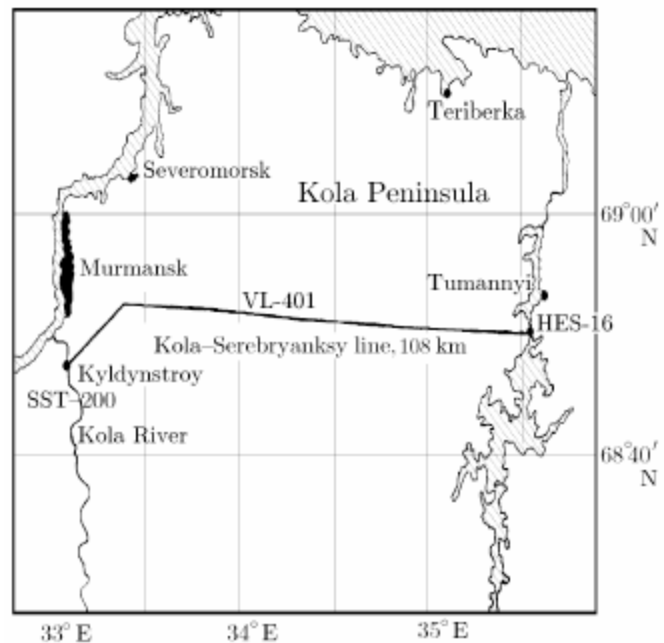


Fig. 1. Location of the 108 km electric power transmission line VL-401 "Kola-Serebryansky" used as an antenna for the geophysical ULF transmitter. The line is grounded at both ends through the buildings of the hydroelectric station HES-16 and the substation SST-200).

reception point for 1000 s. To match the generator and the antenna, we used a capacitor compensating the inductive part of the antenna input resistance and allowing us to excite an antenna current of up to 60-100 A at the maximum allowable voltage and a given power. The testing and measuring complex recorded the current and voltage at the generator output and performed their spectral analysis. The scheme of connecting the ULF/ELF generator to the power line is shown in Fig. 2.

The first experiment on generation and reception of artificial ULF signals using this facility was performed in 1998. The signals were recorded at distances of 800 km (Vidlitsa, Karelia) and 1000 km (St. Petersburg) using the receiving and detecting equipment of RIPC and VIRG-Rudgeofizika [4], and also at a distance of 1500 km at the RRI observation site in Novaya Zhizn', Nizhny Novgorod region. As the

electromagnetic-field sensor, we used an induction magnetometer with a ferrite core together with a low-noise preamplifier (see the description of the RRI reception site). The RIPC hardware/software complex for measuring ULF fields is based on a Briel & Kjaer two-channel spectrum analyzer (model 2032) and a PC. In Vidlitsa, Karelia, the equipment for audiomagnetotelluric sounding (AMTS) was used to detect the electric- and magnetic-field components. The equipment has eight channels for digital recording of signals. We recorded two tangential electric-field components ( $E_x$  and  $E_y$ ), two tangential magnetic-field components ( $H_x$  and  $H_y$ ), and vertical components of the magnetic ( $H_z$ ) and electric ( $E_z$ ) fields. In two remaining channels, reference signals were recorded to decrease the influence of uncorrelated interference signals and instrumental noise. Grounded electric lines with near-electrode amplifiers and wideband induction sensors were used in the AMTS equipment to detect the electric and magnetic fields, respectively.

During the experiments in 1998, three different measurement cycles were performed. Each of them comprised daytime, evening, and night-time measurements. The first measurement cycle was aimed at studying signal behavior in the frequency range 0.6-12 Hz. The second cycle was devoted to studying the resonant properties of the ionosphere in the frequency range 2-3 Hz and involved small-step (about 0.1 Hz) frequency changes. The third cycle included continuous two-hour operation of the facility at each of the three frequencies, 4.8, 10, and 12 Hz.

### 3. Results of the experiments performed in 1993 and 1998

Figure 3 shows a sample record of an artificial ULF signal at the Novaya Zhizn' reception site. The signal processing technique involved accumulation and subsequent averaging of independent signal samples for separating the coherent component. The processing was performed using the A-D complex SK4-72. It follows from Fig. 3 that the signal-to-noise ratio reaches a value of 10-12 dB, which allows us to separate the artificial signal with high accuracy. The signal-to-noise ratio increases proportionally

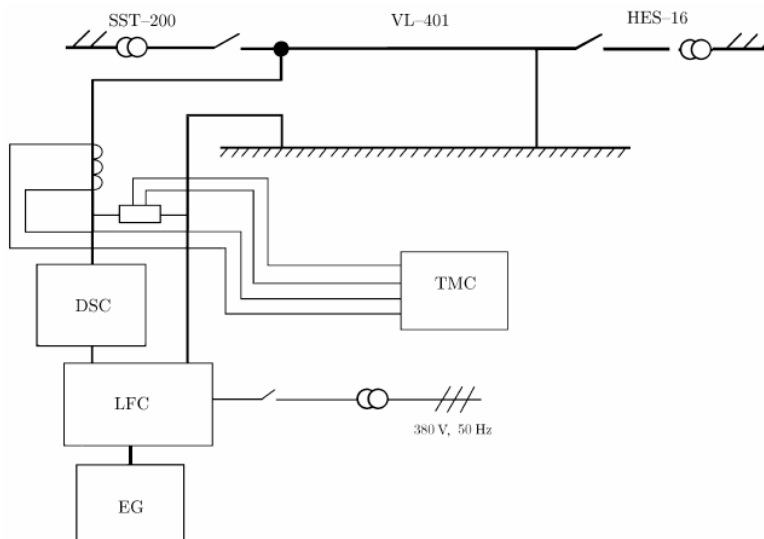


Fig. 2. Scheme of connecting the ULF/ELF generator to the electric power line VL-401: DSC is the discretely switched capacitor, LFC is the low-frequency converter EG is the exciting generator, and TMC is the testing and measuring complex.

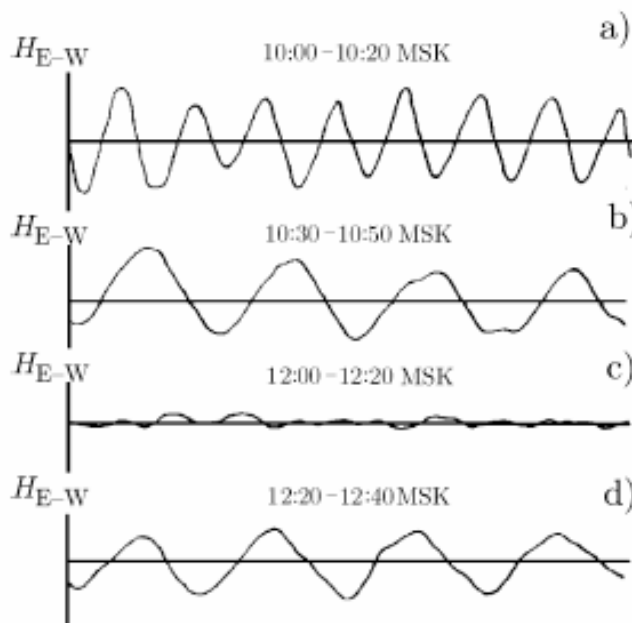


Fig. 3. Averaged samples of the magnetic-field component  $H_{E-W}$ . (a) the artificial ULF signal at frequency 5.2 Hz, (b) the signal at frequency 2.6 Hz, (c) magnetic noise at frequency 2.6 Hz during pause of the ULF transmitter, and (d) the calibration signal with amplitude  $H = 3.6 \cdot 10^{-8}$  A/m at frequency 2.6 Hz. Operation cycle 1, 10:00-11:20 MSK, September 18, 1993.



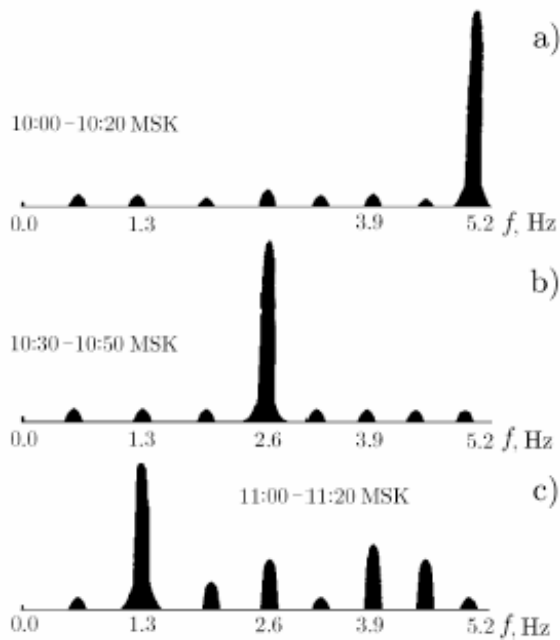


Fig. 4. Frequency spectra of the  $H_{E-W}$  component (see Fig. 3) after the filtration. Panels (a), (b), and (c) correspond to artificial-signal frequencies 5.2, 2.6, and 1.3 Hz, respectively. Operation cycle 1, 10:00-11:20 MSK, September 18, 1993.

interval of increase for all magnetic-field components. The greatest difference between the measured and calculated signal amplitudes is observed after midnight, when the signal amplitude at a frequency of 5.2 Hz is very large, while the signal at 1.3 Hz is strongly suppressed for both magnetic-field components. The calculated and measured magnetic fields of an artificial ULF signal are shown in Fig. 6. It is seen that the signal polarizations almost coincide during daytime and are strongly different during night-time. This strong difference between the measured direction of the magnetic field and the one calculated using the isotropic ionosphere model suggests that the gyrotropic properties of the ionosphere affect significantly the parameters of the received signal during dark time of

the day. Figure 7 shows the amplitudes of  $H_{E-W}$  and  $H_{N-S}$  components of an ULF signal for all operation cycles. This plot demonstrates a large spread in the signal amplitude for the morning hours as compared to the day hours. Figure 8 shows the averaged spectra of background electromagnetic noise generated by lightning discharges. The measurements were performed at the Novaya Zhizn' reception site using the RRI equipment at the time when the artificial ULF signal was detected. The natural noise signal was processed by arithmetic averaging independent spectral samples with the frequency resolution  $\Delta f = 0.1$  Hz. An SK4-72 spectrum analyzer was used. Typically, the averaging was made over  $n = 64-128$  samples (averaging interval  $\tau = 10-20$  min), which decreased the variance of spectral envelope fluctuations to about  $1/\sqrt{n} \cong 10-15\%$ .

to the interval  $\tau = NT$  of averaging, where  $T$  is the sample duration and  $N$  is the number of independent samples ( $N_{max} = 512$  and  $\tau_{max} = 13$  min). Sample frequency spectra of the received signals after the coherent processing are shown in Fig. 4.

Figure 5 shows the measurement results for two orthogonal magnetic-field components of the transmitter signal, i.e., the North-Southern ( $H_{N-S}$ ) and East-Western ( $H_{E-W}$ ) projections, and the calculated total field amplitude  $|H| = (H_{N-S}^2 + H_{E-W}^2)^{1/2}$ . The upper panel in Fig. 5 also shows the theoretical results for  $|H|$  obtained using the model of a homogeneous isotropic ionosphere with the horizontal dipole grounded at both ends [5]. Two values of crust conductivity under the transmitter were used,  $\sigma_1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Sm}^{-1}$  and  $\sigma_2 = 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$ . Comparison of the experimental and theoretical frequency dependences of  $|H|$  shows their fair coincidence during daytime for  $\sigma = 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$ . We assumed in our calculations that the ratio of the phase velocity of a ULF wave to the velocity of light in vacuum  $v/c=1.5$  at all frequencies and that the height of the Earth-ionosphere cavity  $h = 60$  km.

During night time, the frequency dependence of the signal amplitude is strongly different from the predicted one ( $H \propto 1/\sqrt{f}$ ) and, as a rule, has an

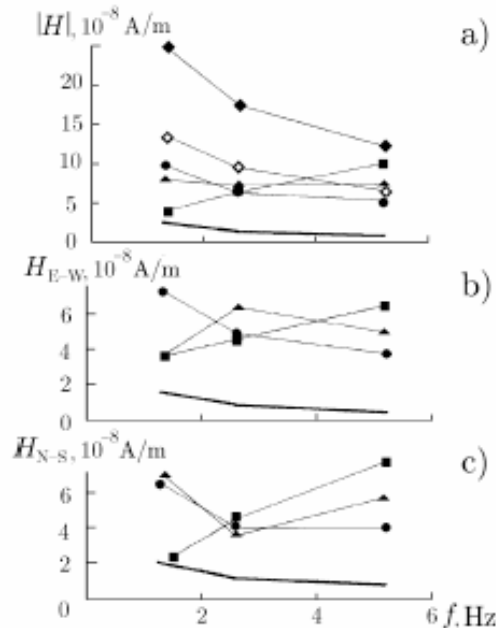


Fig. 5. (a) Absolute values of the transmitted magnetic field calculated for two conductivities of the Earth crust under the transmitter,  $\sigma_1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Sm}^{-1}$  ( $\diamond$ ) and  $\sigma_2 = 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$  ( $\circ$ ), and measured during the first ( $\bullet$ ), second ( $\blacktriangle$ ), and third ( $\blacksquare$ ) transmitter operation cycles. The measured amplitude of (b)  $H_{E-W}$  and (c)  $H_{N-S}$  magnetic-field components for the three operation cycles (the same notation as for panel (+)). The amplitude of the noise magnetic field is shown by a bold solid line.

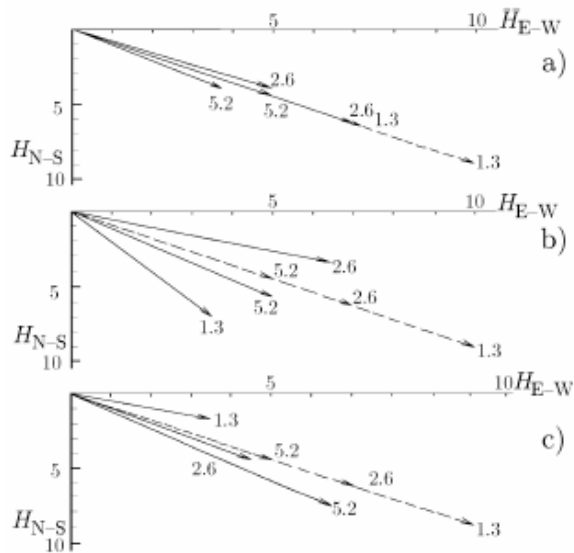


Fig. 6. Magnetic field vectors of ULF signals calculated for the frequencies  $f = 1.3, 2.6,$  and  $5.2$  Hz and crust conductivity  $\sigma = 10^{-4} \text{ S m}^{-1}$  under the transmitter (dashed line) and measured at the corresponding frequencies (solid lines). Panels (a), (b), and (c) correspond to the 1st, 2nd, and 3<sup>rd</sup> transmitter operation cycles, respectively.

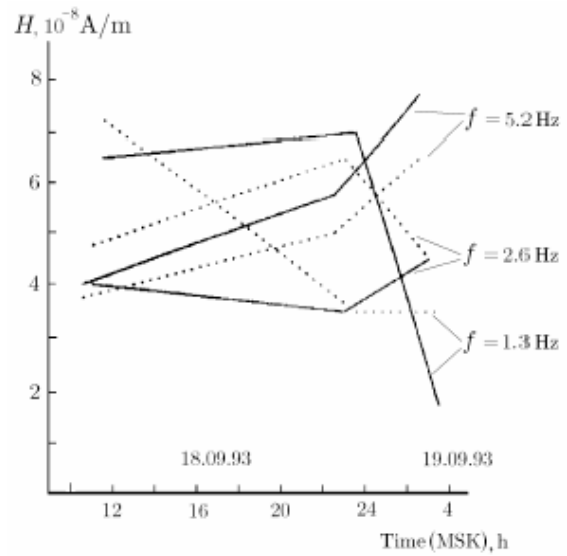


Fig. 7. The amplitudes of the  $H_{N-S}$  and  $H_{E-W}$  components (solid and dotted lines, respectively) of an artificial ULF signal measured during three operation cycles of the transmitter.

Beginning from 19:30 MSK in September 18, 1993, a wideband maximum was observed in the noise spectrum below the Schumann resonance. The position of the maximum drifted in time from about 3 Hz at 21:00 MSK in September 18, 1993 to 5-6 Hz at 03:00-04:00 MSK in September 19, 1993. Comparison of Figs. 7 and 8 shows that amplitude variations in the artificial ULF signal at frequencies 2.6 and 5.2 Hz basically follow temporal variations in the wideband spectral maximum of low-frequency magnetic noise. This maximum can be related to the ionospheric MHD waveguide. The anomalous amplitude-frequency dependence of the artificial ULF signal during night-time can also be related to the resonant influence of the ionosphere, which results in formation of a resonance spectral structure (RSS) for the noise magnetic field, as is seen in Figs. 8 and 9 [6, 7]. The RSS manifests itself as deep harmonic modulation in the spectrum of electromagnetic noise on the

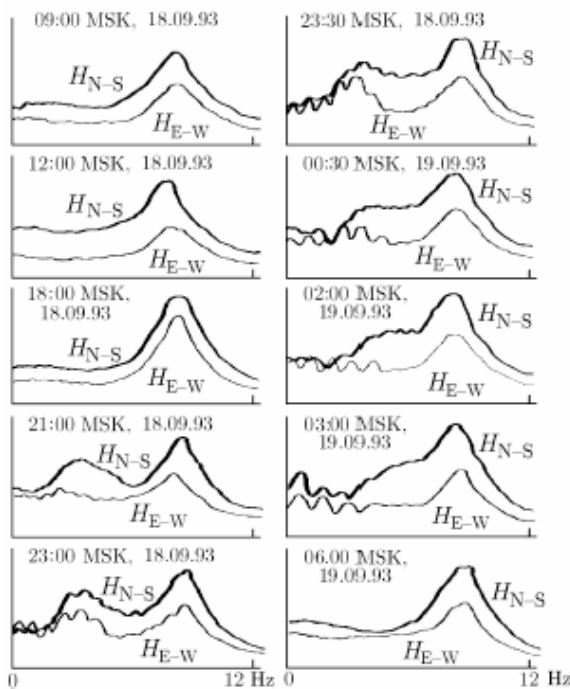


Fig. 8. Evolution of the averaged normalized spectrum of the noise magnetic field during the ULF experiment of September 18-19, 1993.

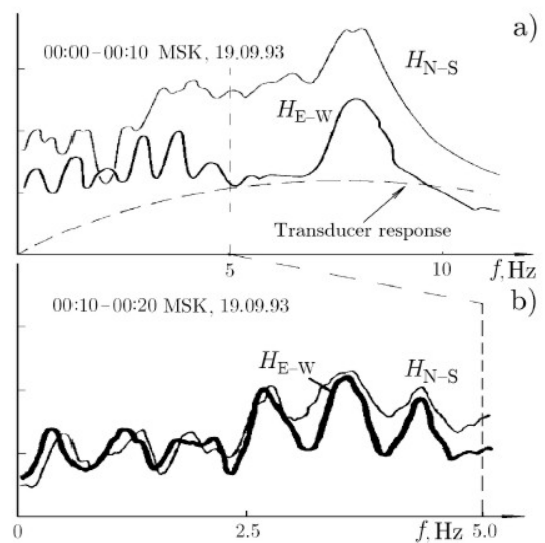


Fig. 9. Normalized spectra of the noise magnetic field for two frequency windows with widths 12 Hz (a) and 5 Hz (b).

ground with the characteristic frequency scale  $\Delta f_{k,k+1} = f_{k+1} - f_k$ , where  $f_k$  are the resonance frequencies of the  $F$ -layer ionospheric Alfvén resonator related to propagation of Alfvén waves guided by the Earth's magnetic field between reflecting regions at heights 100 and 1000 km. Figure 8 shows the spectra of the noise magnetic field in which the resonance spectral structure with  $\Delta f \sim 0.77$  Hz is clearly seen for the  $H_{E-W}$  magnetic component. We have not yet succeeded in revealing the resonance spectral structure of artificial ULF signals detected at Novaya Zhizn'.

Figures 10 and 11 show sample recordings of an artificial ULF signal obtained at Novaya Zhizn' during the experiments in 1998. Variations in the signal amplitude at frequency 4.8 Hz for two linear magnetic-field polarizations ( $H_{N-S}$  and  $H_{E-W}$ ) are shown in Fig. 10, and two spectra of the signal together with noise at the output of a two-channel coherent receiver are shown in Fig. 11. In the experiments of 1998, a PC with an A-D converter and original software for spectral, correlation, and coherent analysis were used during data acquisition and processing. It is seen in Fig. 10 that the phase difference between two magnetic components of the signal vanishes after sunrise, i.e., after the transition to daytime ionospheric conditions. The phase difference between the components  $H_{N-S}$  and  $H_{E-W}$  means that the artificial signal is elliptically polarized, which confirms the influence of ionospheric anisotropy on the signal detected at night.

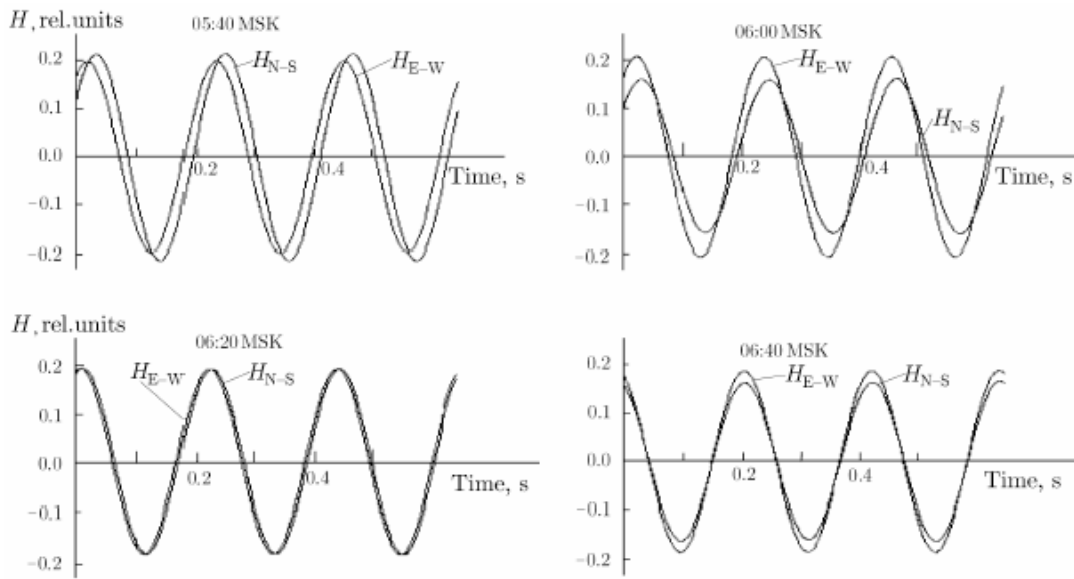


Fig. 10. Variations of a 4.8-Hz signal at the output of a coherent receiver for linear  $H_{N-S}$  and  $H_{E-W}$  polarizations of the magnetic field. The interval of coherent accumulation was 0.6 s and the averaging interval was 10 min. Morning operation cycle. 04:00-07:00 MSK. July 22, 1998. The excitation current was 70 A.

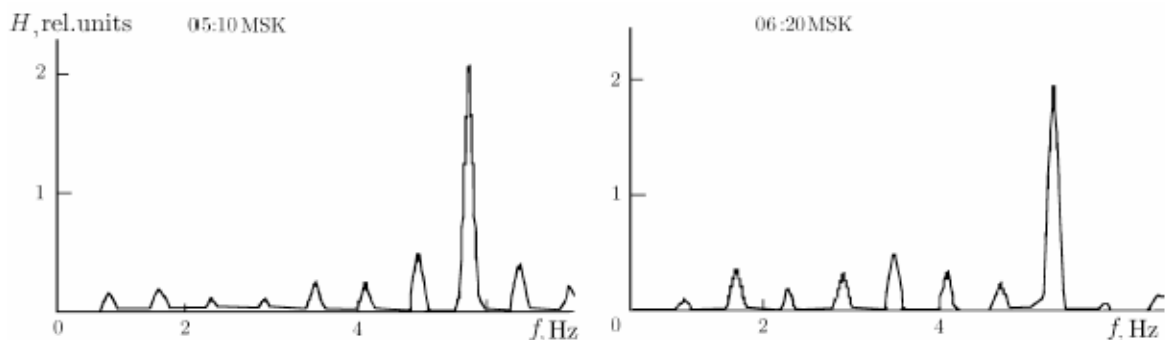


Fig. 11. Two sample spectra of the output signal of a two-channel coherent receiver ( $H_{N-S}$  component). The frequency of the transmitted signal was 4.8 Hz and the averaging interval was 10 min. Morning operation cycle, 04:00-07:00 MSK, July 22, 1998.

Figures 12a and 13a show the amplitude-frequency dependences of two linearly polarized ( $H_{N-S}$  and  $H_{E-W}$ ) and two circularly polarized ( $H_R$   $H_L$ ) magnetic components for morning (Fig. 12a) and evening (Fig. 13a) operation cycles. Sample spectra of the noise magnetic field for the corresponding observation periods are shown in Figs. 12b and 13b,

respectively. As is seen in Fig. 13, in the evening there is a large difference in the shapes of the amplitude-frequency dependences of different magnetic components. At the same time, a significant difference in spectrum shapes exists for different polarizations of magnetic noise. The strongest difference exists for spectra of  $H_R$  and  $H_L$  polarizations in the evening. This fact is related to the influence of gyrotropy of the night-time ionosphere on natural magnetic noise.

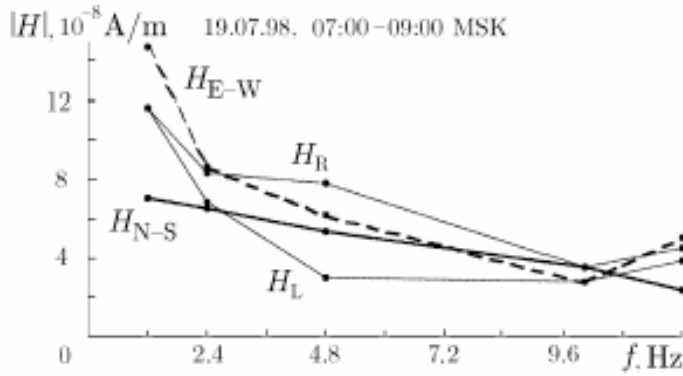


Fig. 12a. Frequency dependence of the artificial signal amplitude for two linearly polarized ( $H_{N-S}$  and  $H_{E-W}$ ) and two circularly polarized ( $H_R$  and  $H_L$ ) magnetic components. The notations  $H_R$  and  $H_L$  correspond to the right-hand (electron) and left-hand (proton) polarizations, respectively. Excitation current is 70 A.

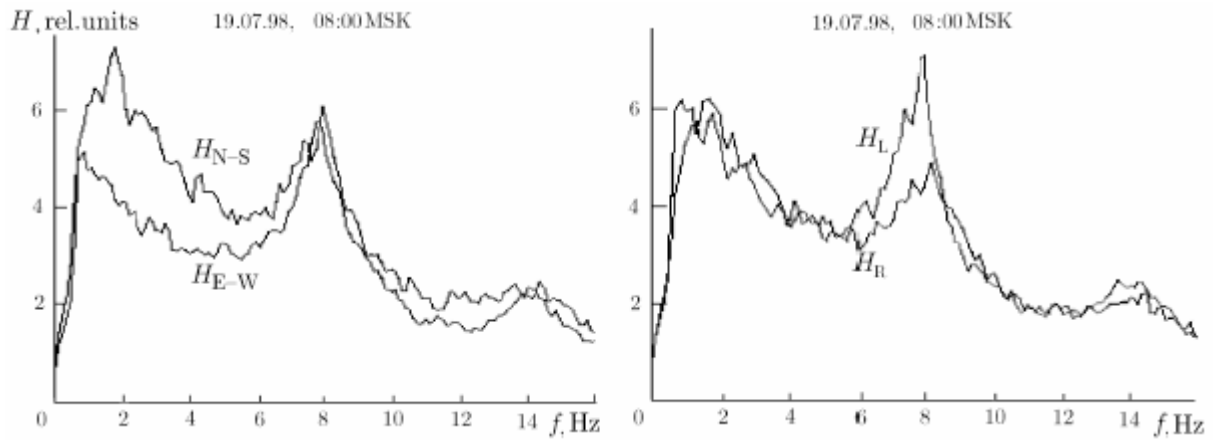


Fig. 12b. Sample averaged spectra of magnetic noise for moderate thunderstorm activity. The averaging interval is 10 min. The amplitude frequency response of the induction magnetic sensors is not shown.

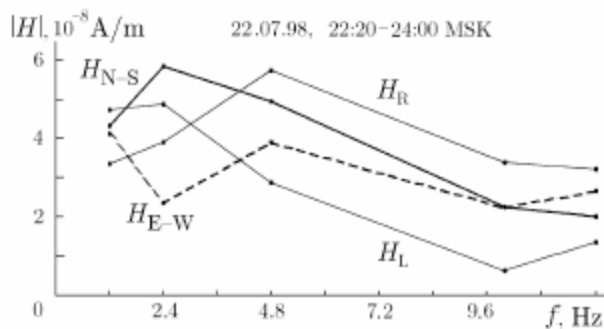


Fig. 13a. Same as in Fig. 12a, but for the evening operation cycle.

During the experiments in 1998, the ULF signal was also recorded at distances of 800 and 1000 km (Vidlitsa, Karelia and St. Petersburg). The digital processing of a signal comprised a spectral analysis and calculation of the mutual coherence coefficient  $k \sim \int \overline{H_y(t)E_x(t)} e^{-i\omega t} dt$  as well as the impedance  $Z(\omega) = \overline{H_y(\omega)E_x(\omega)} / \overline{H_y^2(\omega)}$  and the admittance  $Y(\omega) = \overline{H_y(\omega)E_x(\omega)} / \overline{E_x^2(\omega)}$  of the underlying surface.

Figure 14 shows sample records of the orthogonal electromagnetic-field components  $H_x$  and  $E_y$  and processing results for the detected fields, namely, the coherence coefficient  $k$  of the components and the apparent resistance  $\rho_a$  of the underlying surface:

$\rho_a = iZ^2(\omega) / (\omega\mu_0) = i / (\omega\mu_0 \times Y^2(\omega))$ , where  $\mu_0$  is the magnetic permeability of vacuum. It is easily seen that the coherence coefficient is maximum at the transmitter frequency (4.8 Hz). The values of  $\rho_a$  calculated using admittance and impedance characteristics are equal. Therefore, using a controlled source yields the higher measurement accuracy for the apparent resistance than using natural fields.

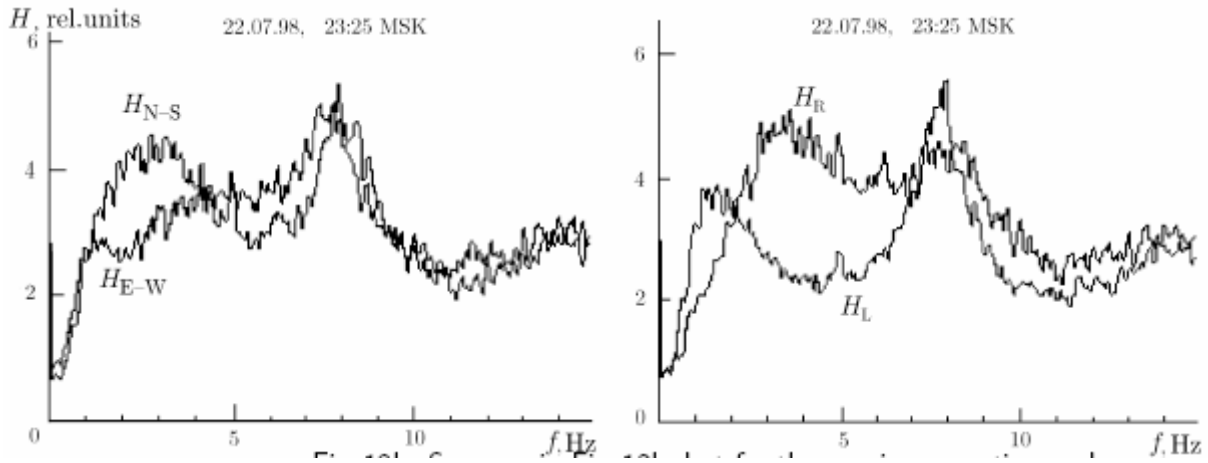


Fig. 13b. Same as in Fig. 12b, but for the evening operation cycle.

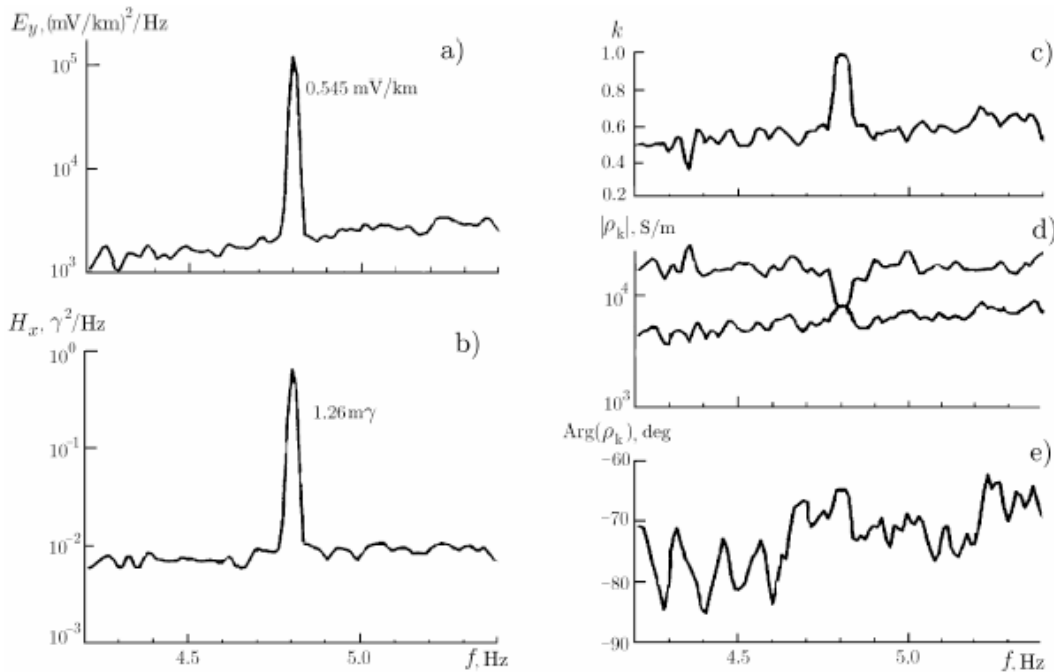


Fig. 14. The ULF signal detected in Vidlitsa, Karelia, in July 17, 1998, 03:58{04:52 MSK. The panels on the left show the spectra of the  $E_y$  and  $H_x$  components ( $\gamma = 10^{-5}$  G). The panels on the right show the coherence coefficient  $k$  and amplitude  $|\rho_k|$  and phase  $\varphi_a$  of the apparent resistance  $\rho_a$  of the underlying surface, calculated using the measured field values.

#### 4. Discussion and conclusions

Experimental studies performed in 1993 and 1998 showed a strong difference between the daytime and nighttime amplitude-frequency dependences and polarizations of artificial ULF signals. Variations in the profiles of electron density and collision frequencies of electrons and ions with neutrals in night and evening time cause strong variations in the parameters of the detected ULF signal and the spectrum of magnetic-field noise. We thoroughly developed a technique for calculating the magnetic components of a signal radiated by the horizontal magnetic dipole in a planar waveguide bounded from above by an anisotropic, vertically inhomogeneous ionosphere. The solution at the surface of a perfectly conducting Earth was obtained in the form of Fourier-Bessel transforms of the desired field components, and impedance-type boundary conditions were used for an arbitrary inclination angle of the geomagnetic field. An anisotropic, inhomogeneous ionosphere was modelled by a set of homogeneous plane layers with the parameters of a standard mid-latitude ionosphere at heights from 60 to 1000 km for moderate solar activity. Figure 15 shows the amplitude-frequency dependences of the  $H_{N-S}$  component for day and night periods, calculated using the chosen ionospheric model for the Novaya Zhizn' reception site. The calculated curves represent more adequately the anomalous amplitude-frequency dependence of an artificial ULF signal measured at Novaya Zhizn' in the night-time. The used

ionospheric model also allows one to take into account the resonant properties of the night-time ionosphere, evident from the oscillatory behavior of the frequency dependence.

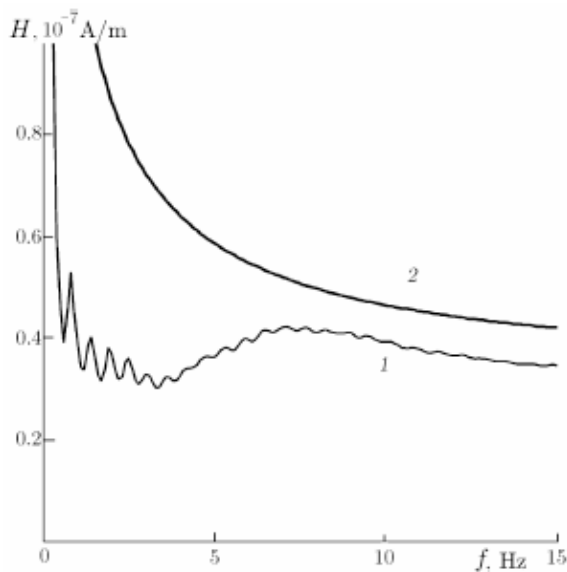


Fig. 15. Amplitude-frequency dependence of the magnetic-field component  $H_{N-S}$  calculated for the ULF source 'Kola{Serebryansky'" and the reception site Novaya Zhizn' using the model of the anisotropic and inhomogeneous ionosphere. Curves 1 and 2 correspond to the nighttime and daytime conditions, respectively.

daytime suggests that we measure the signal propagating along the Earth-ionosphere cavity. During night-time, the situation is more complicated, and one must take into account the influence of large-scale waveguide properties and local resonant properties of the ionosphere.

During the experiments of 1993 and 1998, in which the controlled source of ULF electromagnetic fields was used, the artificial ULF signal was received at a distance of 1500 km. High-sensitivity receiving equipment and stable radiating current in the antenna exciting the ULF field in the Earth-ionosphere cavity allowed us to detect the signal with high precision in a frequency range of 1.3 to 12 Hz. All the observed features of the artificial ULF signal are related to the influence of waveguide and resonance structures in the near-Earth space. The Earth-ionosphere cavity, the MHD waveguide in the ionospheric  $F_2$  layer, and the ionospheric Alfvén resonator are most important of them. Thus, the properties of the detected ULF signal can contain important information on the parameters of the above-mentioned near-Earth structures. Moreover, the detected artificial ULF signal can be used to obtain the apparent resistance of the underlying surface at the reception point. The accuracy of the underlying-surface parameters obtained using a controlled ULF source greatly exceeds the accuracy of the results achieved using natural electromagnetic fields.

The authors wish to thank A. G. Litvak for his constant interest in this study and helpful discussions. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project Nos. 01-02-16742 and 0102-31019), the Federal Program "Universities of Russia" (grant No. 015.01.01.069), the Russian Ministry of

Education (grant No. E00-8.0-44), and INTAS (grant No. 99-0335).

#### References

1. E.P. Velikhov, A. A. Zhamaletdinov, L.A. Sobchakov, et al., Dokl. Rossiisk. Akad. Nauk, 338, No. 1, 11 (1994).
2. A.K. Saraev, P.M. Kostkin, and V.G. Ivochkin, Fiz. Zemli, No. 7, 50 (1998).
3. P. P. Belyaev, S. V. Polyakov, E. N. Ermakova, and S. V. Isaev, Izv. Vysshikh Uchebn. Zaved., Radiofiz., 40, 1305 (1997).
4. A. B. Fedorov, A. A. Eliseev, A. B. Kocherov, K.D. Ratnikov, and G.V. Red'ko, Geofiz. Apparat., No. 101, 81 (1998).
5. P.R. Bannister, F.J. Williams, A.L. Dahlvig, and W.A. Kraimer, IEEE Trans. Commun., 22, No. 4, 412 (1974).
6. P. P. Belyaev, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Yu. Trakhtengerts, Izv. Vysshikh Uchebn. Zaved., Radiofiz., 32, 663 (1989).

7. P. P. Belyaev, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Yu. Trakhtengerts, *Izv. Vysshikh Uchebn. Zaved., Radiofiz.*, 32, No. 7, 802 (1989).
8. D.D. Sentmann, *Radio Sci.*, 22, No. 4, 595 (1987).
9. S. Fujita, *J. Geophys. Res.*, 93, No. 12, 14674 (1988).
10. C. Greifinger and P. Greifinger, *Radio Sci.*, 9, No. 5, 533 (1974).
11. P.P. Belyaev, S.V. Polyakov, V. O. Rapoport, and V. Y. Trakhtengerts, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 52, No. 9, 781 (1990).
12. S.V. Polyakov and V. O. Rapoport, *Geomagn. Aeron.*, 21, No. 5, 610 (1981).

**Сараев А.К.<sup>1</sup>, Денисов Р.В.<sup>1</sup>, Шлыков А.А.<sup>1</sup>, Головенко В.Б.<sup>2</sup>, Ларионов К.А.<sup>2</sup>, Васильев А.В.<sup>3</sup>, Владимиров Д.Н.<sup>3</sup>, Астахова Н.Л.<sup>3</sup> Особенности метода CSAMT с мощным источником.** //Материалы пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 1.- СПб.: СПбГУ, 2011. С.1-4. (тезисы расширенные)

<sup>1</sup> - Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, [aks@AS1002.spb.edu](mailto:aks@AS1002.spb.edu)

<sup>2</sup> - ООО «МикроКОР», Санкт-Петербург, [mail@microkor.biz](mailto:mail@microkor.biz)

<sup>3</sup> - Российский институт мощного радиостроения – РИМР, Санкт-Петербург, [klon@land.ru](mailto:klon@land.ru)

### Введение

Метод аудиоманнитотеллурических зондирований с контролируемым источником (Controlled source audiomagnetotellurics - CSAMT) обычно применяется при повышенном уровне промышленных помех, когда стандартный метод аудиоманнитотеллурических зондирований (AMTЗ), основанный на измерениях естественных электромагнитных полей, не позволяет получать данные высокого качества. По сравнению с AMTЗ метод CSAMT обеспечивает получение более качественных данных в частотных диапазонах нестабильного поведения естественного электромагнитного поля 0.1-10 Гц и его низкого уровня 700-3000 Гц. При работах методом CSAMT требуется меньше время накопления данных, чем в методе AMTЗ, что повышает производительность работ. В методе CSAMT обычно измеряются горизонтальные составляющие электрического и магнитного поля контролируемого источника (чаще всего заземленного на концах кабеля длиной несколько километров) в диапазоне частот 0.1-10000 Гц. По данным измерений вычисляют частотные зависимости амплитуды импеданса (или кажущегося сопротивления) и фазы импеданса, и в результате инверсии строят геоэлектрические разрезы в диапазоне глубин от первых десятков метров до 2-3 км.

Точность измерений в методе CSAMT не зависит от сезонных и суточных вариаций уровня естественного электромагнитного поля. Это является важным фактором при мониторинговых наблюдениях для выявления предвестников землетрясений [Сараев и др., 1999]. В этой связи в последние годы развивается направление, связанное с использованием мощных источников электромагнитного поля с дальностью действия сотни-тысячи километров для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород. В экспериментах с российской СНЧ-радиостановкой «Зевс», расположенной на Кольском п-ове, были показаны возможности измерения сигналов для реализации работ методом CSAMT на удалении 7000 км [Сараев и др., 2004]. Эксперименты по измерениям сигналов китайской СНЧ-радиостановки выполнены в процессе работ по созданию системы мониторинга сейсмической активности в Китае [Zhao et al., 2010]. Развивается направление, связанное с использованием в качестве антенн промышленных линий электропередач (ЛЭП), и получены данные по измерениям сигналов на удалении до 1000-2000 км [Zhamaletdinov et al., 2008].

Ниже рассматриваются особенности электромагнитных полей мощных источников на удалении сотни-тысячи километров от источника, приводится характеристика аппаратно-программного комплекса CSAMT с мощным источником и примеры регистрации сигналов российской СНЧ-радиостановки «Зевс» на значительных удалениях от источника (тысячи километров).

### Различные зоны около кабеля конечной длины

Для контролируемых источников, включая кабель конечной длины, обычно выделяются ближняя, промежуточная и дальняя зоны. Ближняя зона соответствует условию  $|kr| \ll 1$ , промежуточная -  $|kr| \sim 1$  и дальняя зона -  $|kr| \gg 1$  [Zonge and Hughes, 1991]. В дальней зоне используются модель первичного поля в виде плоской вертикально падающей волны и хорошо разработанные магнитотеллурические подходы и методы интерпретации данных.

В дополнение нами было предложено выделение волноводной зоны [Saraev and Kostkin, 1997, 1998, 1999]. На больших расстояниях из источника (сотни - тысячи километров) электромагнитное поле кабеля отличается от квазистационарного поля, которому соответствует дальняя зона, и существенным образом зависит от влияния ионосферы и токов смещения в воздухе. Эти факторы, обычно не учитываемые на небольшом удалении, играют значительную роль на большом расстоянии от источника.

Положение различных зон кабеля, направленного по горизонтальной оси, при измерениях импеданса по

максимальным значениям полей  $E$  и  $H$ , показаны на рис. 1. В волноводной зоне наблюдаются следующие эффекты:



Рис. 1. Различные зоны около кабеля конечной длины ( $L=25$  км,  $f=5$  Гц,  $\rho=5000$  Ом·м).

1) Более медленное ослабление полей по сравнению с квазистационарным полем;

2) Изменение диаграммы направленности источника с относительным увеличением поля вдоль кабеля (горизонтальная ось  $X$ ) по сравнению с дальней зоной (рис. 2). Для дальней зоны величина  $E_x$  поперек кабеля вдвое превышает соответствующую величину вдоль кабеля (рис. 2а). Напротив, в волноводной зоне величина  $E_x$  вдоль кабеля превышает соответствующую величину поперек

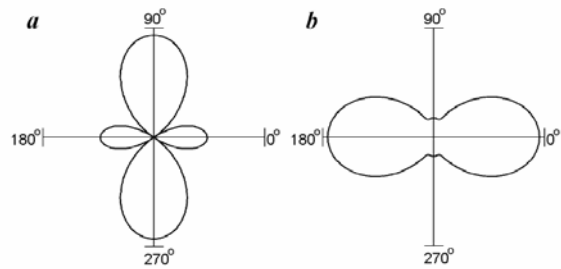


Рис. 2. Диаграммы направленности для  $|E_x|$ , а – квазистационарное поле; б – волноводное поле на расстоянии 3000 км от источника ( $L=30$  км,  $f=80$  Гц,  $\rho=10000$  Ом·м).

кабеля (в пять раз на расстоянии 3000 км, как показано на рис. 2б).

3) Появление эллиптичности поляризации поля (рис. 3), которая дает возможность для реализации тензорных измерений с одним кабелем.

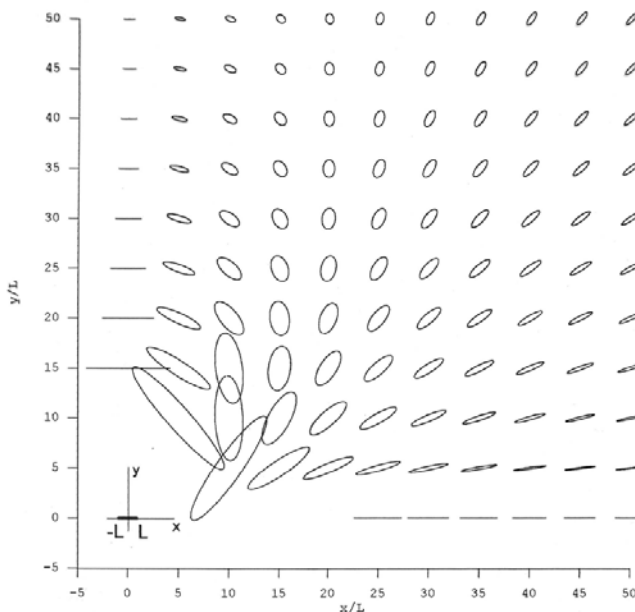


Рис. 3. Эллипсы поляризации для горизонтальной составляющей электрического поля в первом квадранте  $100 \times 100L$ ,  $L$  – полудлина кабеля ( $L=30$  км,  $f=80$  Гц,  $\rho=10000$  Ом·м).

4) Изменение контуров областей, благоприятных для проведения работ методом CSAMT с измерениями импедансов  $Z_{xy}$  и  $Z_{yx}$ , и увеличением благоприятной области (плавного изменения  $|E_x|$  и  $|H_y|$ ) вдоль кабеля при измерениях  $Z_{xy}$  (рис. 4).

В волноводной зоне сохраняется возможность использования модели первичного поля в виде плоской волны.

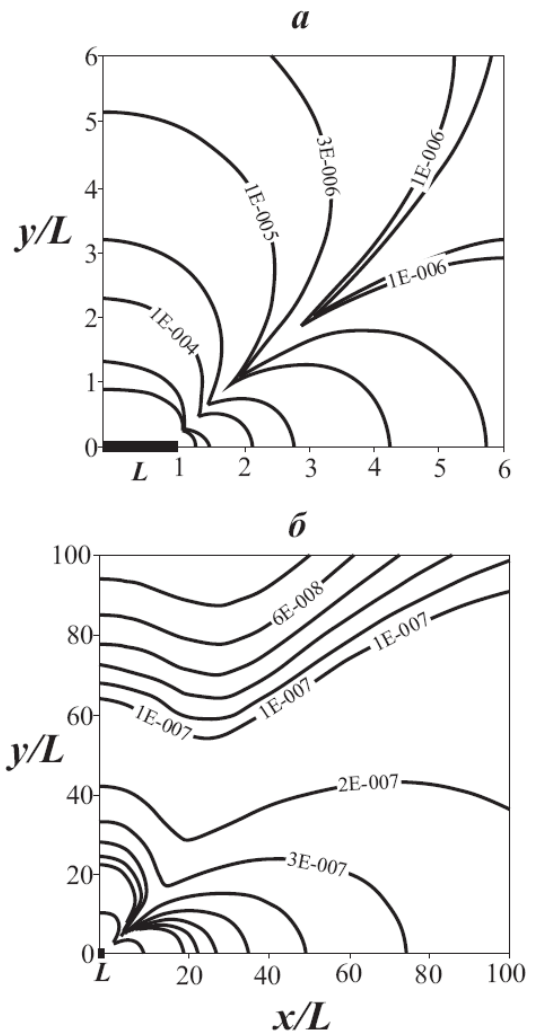


Рис. 4: Планы изолиний  $|E_x|$  для квазистационарного (а) и волноводного (б) поля ( $L=30$  км,  $f=80$  Гц,  $\rho=10000$  Ом·м).



### Аппаратурно-программный комплекс метода CSAMT с мощным источником

В состав комплекса входит мощный мобильный генератор, приемник и программные средства обработки и интерпретации данных. Для долговременных наблюдений (мониторинг сейсмической активности и др.) в качестве антенны используется специально построенная воздушная ЛЭП, а при поисково-картировочных исследованиях раскладывается кабель. Особое внимание уделяется выбору площадки для размещения антенной системы и обустройству заземлений. В благоприятных условиях (кабель расположен на высокоомном блоке пород, низкое сопротивление заземлений) дальное действие комплекса составляет первые сотни километров.

**Генератор.** В качестве мощного мобильного генератора используется генератор «Кола», разработанный в ОАО РИМР. Он представляет собою блок непосредственного преобразователя частоты без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки. В состав мощного генератора входят усилитель мощности, блок управления, задающий прецизионный низкочастотный генератор, согласующее устройство. Основные характеристики: диапазон рабочих частот 0.1-10000 Гц, шаг сетки частот определяется задающим генератором. Вид сигнала – синусоидальный, мощность – до 50 кВт, напряжение – 380 В, ток – до 120 А. Тип антенн – кабельные антенны длиной обычно до 3 - 5 км или воздушные линии электропередачи, питание – трехфазное переменное 380В/50Гц. Дополнительно производится автоматизированное управление измерениями и автоматизированный контроль и регистрация выходных параметров генератора. Относительно небольшие масса генератора (около 40 кг) и габаритные размеры (600x600x800 мм) обеспечивают его удобную транспортировку и эксплуатацию в полевых условиях.

**Приемник.** В качестве приемника используется аппаратура АКФ-4М, разработанная Санкт-Петербургским государственным университетом и ООО «МикроКОР» [Сараев и др., 2003]. Аппаратура включает цифровой регистратор с четырьмя синхронными каналами и 24-разрядными АЦП в каждом канале. Частотный диапазон 0.1-800 Гц, частоты дискретизации входных сигналов 160, 1600 и 3200 Гц, объем встроенной памяти 1024 Мб. В аппаратуре АКФ-4М установка измерительных параметров выполняется при помощи клавиатуры регистратора или внешнего компьютера. Полевые наблюдения в точках зондирования производятся с записью данных во встроенную память. Регистрируются временные ряды или спектрограммы, кажущееся сопротивление и фаза импеданса вычисляются непосредственно в измерительном блоке. Обеспечивается программное управление аппаратурой, визуализация спектральных характеристик сигналов производится на дисплее регистратора, и оценка качества данных выполняется непосредственно на точке наблюдений. Работы производятся с использованием GPS приемника (привязка по координатам и времени).

**Программные средства.** Программное обеспечение включает программу управления процессом измерений и первичной обработки данных с получением кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса. Для обработки данных, полученных в сложных условиях (неблагоприятная помеховая обстановка, низкий уровень и нестабильность естественного электромагнитного поля), применяется программа, использующая различные виды робастных процедур. Для визуализации исходных данных и результатов интерпретации применяется просмотра и анализа данных по отдельным точкам зондирования, по профилям и по площади. При интерпретации используются методы и программные средства 1D и 2D инверсии.

### Примеры измерений сигналов СНЧ-радиоустановки «Зевс»

Ниже приводятся примеры измерений сигналов (спектральной плотности мощности – СПМ магнитного поля) СНЧ-радиоустановки «Зевс» при помощи аппаратуры АКФ в различных регионах России (в Иркутской обл. – рис. 5, на Камчатке – рис. 6) и в Китае (рис. 7), показывающие возможность реализации работ методом CSAMT на расстояниях 4000-7000 км от мощного источника.

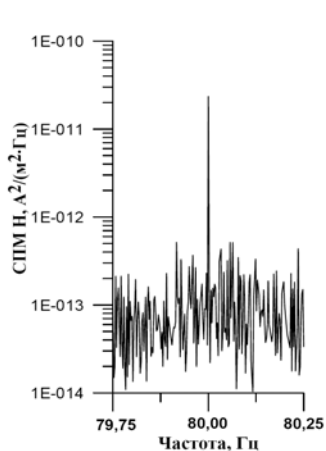


Рис. 5. Измерения в Иркутской обл.(4000 км от источника) при частотном разрешении 0.0024 Гц.

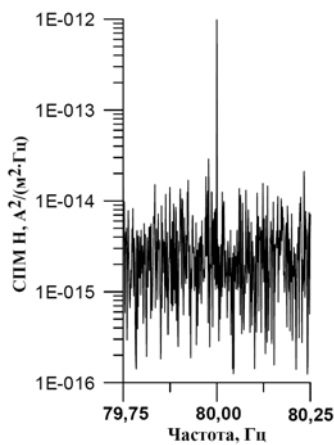


Рис. 6. Измерения на Камчатке (5000 км от источника) при частотном разрешении 0.0011 Гц.

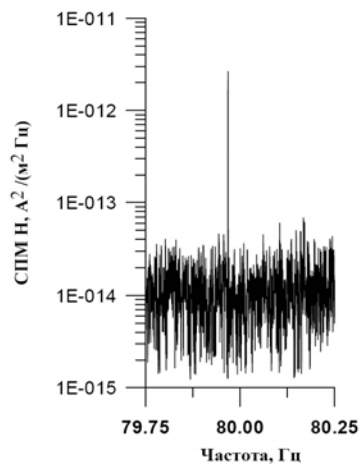


Рис. 7. Измерения в Китае (7000 км от источника) при частотном разрешении 0.00032 Гц.

### Список литературы

1. Сараев А. К., Косткин П. М. Структура электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки // Вопросы геофизики. Вып. 35, СПб.: Издательство СПбГУ, 1998. С. 117-135.
  2. Сараев А.К., Пертель М.И., Парфентьев П.А., Прокофьев В.Е., Харламов М.М. Экспериментальные исследования электромагнитного поля СНЧ-радиоустановки для целей мониторинга сейсмической активности на Северном Кавказе. Физика Земли, 1999, № 2. С. 17-24.
  3. Сараев А.К., Пертель М.И., Кочеров А.Б., Косткин П. М., Харламов М.М., Гуозе Чжао, Джи Танг, Кианху Денг, Джунменг Дажао, Джионг Ванг. Оценка возможностей геофизического использования сигналов российской СНЧ-радиоустановки «Зевс» в Китае // Вопросы геофизики. Вып. 36, СПб.: Издательство СПбГУ, 2004. С. 102-108.
  4. Сараев А., Головенко В., Ларионов К., Смирнова Т. Аппаратура аудиоманнитотеллурических зондирований АКФ-4М // Индустрия, 2003, № 3, С. 110.
  5. Saraev A.K. and Kostkin P.M. Structure of ELF radio station electromagnetic field. Russian-German seminar "Actual problems in deep EM studies", Moscow, Russia, March 11-13, 1997.
  6. Saraev A., and Kostkin P., 1999. Waveguide effects in the ELF radio stations electromagnetic field, RIO'99 International Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 15-19 August 1999.
  7. Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Korotkova T.G., Efimov B.V., Barannik M.B., Kolobov V.V., Prokopchuk P.L., Kopynenko Yu.A., Kopynenko Ye.A., Ismagilov V.S., Smirnov M.Yu., Vagin S.A., Tereschenko Ye.D., Vasilijev A.N., Gokhberg M.B., T. Korja. CS MT-AMT sounding of the Fennoscandian (Baltic) shield with the use of industrial power lines (experiment FENICS-2008) // The 19<sup>th</sup> international workshop on electromagnetic induction in the Earth. Abstracts, Vol. 1. Beijing, China. 2008. P. 180-185.
  8. Zhao G.Z., Wang L.F., Tang J., Chen X.B., Zhan Y., Xiao Q.B., Wang J.J., Cai J.T., Xu G.J., Wan Z.S., Wang X., Yang Y., Dong Z.E., Fan Y., Zhang J.H., and Gao Y. New experiments of CSELF electromagnetic method for earthquake monitoring, Chinese J. Geophysics, 2010, 53 (3), 479-486.
  9. Zonge K.L., and Hughes L.J. Controlled source audio-frequency magnetotellurics. Electromagnetic methods in applied geophysics. V.2 - Applications. Series: Investigations in geophysics. 1991. No 3, 713-809.
- 

**Колобов В. В.<sup>1</sup>, Баранник М. Б.<sup>1</sup>, Жамалетдинов А.А.<sup>2</sup> Генераторно-измерительный комплекс «Энергия» для электромагнитного зондирования литосферы и мониторинга сейсмоактивных зон // под ред. д.т.н. Б.В. Ефимова Санкт-Петербургский государственный университет, 2013.**

<sup>1</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, e-mail: [l\\_i@mail.ru](mailto:l_i@mail.ru)

<sup>2</sup>Геологический институт Кольского научного центра РАН, [abd.zham@mail.ru](mailto:abd.zham@mail.ru)

Настоящая монография явилась результатом объединения усилий ученых – геофизиков и энергетиков для решения задач научно-исследовательского и практического содержания. Поэтому в книге, наряду с проектно-конструкторскими разработками, связанными с созданием электроразведочных генераторов нового поколения (Энергия-2, Энергия-2М и Энергия-3), нашли отражение вопросы их практического применения. Рассмотрены вопросы создания новой техники для измерения сигналов (станция КВВН-7), краткие основы теории электромагнитных зондирований, а также практически важные вопросы согласования мощных источников переменного тока с воздушными линиями электропередачи, их электромагнитной совместимости с оборудованием подстанций и с кабельными линиями связи. Особое место занимают результаты полевых испытаний созданной генераторно-измерительной техники. Описаны уникальные эксперименты по глубинному зондированию земной коры с применением промышленных ЛЭП на территории Балтийского щита и в Западной Сибири.

Монография представляет интерес для специалистов, занимающихся разработкой генераторно-измерительных систем на основе новейшей силовой преобразовательной техники и микроэлектроники. Книга может представить особый интерес для геофизиков, занимающихся исследованием строения земной коры и вопросами мониторинга сейсмической активности с применением электромагнитных методов, а также для студентов геофизических и энергетических специальностей.

Научный редактор доктор технических наук Б.В. Ефимов  
Санкт-Петербургский государственный университет, 2013

### Введение

Применение глубинных электромагнитных зондирований позволяет дистанционно изучать электропроводность земных слоев от дневной поверхности до глубин во многие сотни километров. Зондирования с мощными контролируруемыми источниками, обозначим их как CSEMS (Control Source Electro Magnetic Sounding) обладают целым рядом преимуществ в сравнении с традиционным магнитотеллурическим методом зондирования (МТЗ) [Бердичевский, 1968], основанным на использовании естественных вариаций

электромагнитного поля Земли (ЕЭМПЗ).

Главным преимуществом CSEMS является то, что положение и конфигурация контролируемого источника точно известны. Более того, он может быть расположен в оптимальных геологических условиях и с заданной ориентировкой излучающих линий относительно преимущественного простирания геологических структур. Заранее может быть выбран необходимый частотный диапазон контролируемого источника, отвечающий требуемому диапазону глубин в данной геоэлектрической обстановке. Современные мощные генераторные устройства и компьютеризированные цифровые измерительные системы позволяют накапливать и уверенно регистрировать полезный сигнал на фоне интенсивных промышленных помех. Процедура записи сигналов контролируемого источника достаточно оперативна. Надежность результатов регистрации определяется оператором непосредственно на полевой точке по соотношению «сигнал-шум» и по оценкам когерентности сопряженных компонент поля. Важным преимуществом зондирования с контролируемыми источниками является возможность анализа и интерпретации результатов по нескольким взаимно дополняющим параметрам – не только по входному импедансу, но и по отдельно взятым электрическим и магнитным компонентам поля и по их соотношениям. Наконец, зондирования с заземленными контролируемыми источниками позволяют использовать все преимущества совместного анализа гальванической и индукционной мод.

К недостаткам CSEMS следует отнести, прежде всего, высокую стоимость работ, связанную с необходимостью использования дорогостоящих генераторных устройств и питающих линий, повышенные требования к технике безопасности работ, а также низкую мобильность, обусловленную необходимостью перемещения генератора и питающих линий по мере изучения территории. Зондирования с контролируемыми источниками обладают ограниченной площадью исследований, так как по мере удаления от источника происходит ослабление поля и снижение точности. В то же время, по мере приближения к источнику падает информативность, происходит переход в ближнюю зону, где частотное зондирование теряет смысл, поскольку отклик среды перестает зависеть от частоты. К недостаткам CSEMS принято также относить сложность количественной интерпретации данных, особенно при переходе к анализу 2-х и 3-х мерных сред с учетом влияния ближней и промежуточной зон. При проведении зондирования с контролируемыми источниками на дальних и сверхдальних разностях (сотни километров и более) к отмеченным проблемам CSEMS добавляется необходимость учета влияния на результаты наблюдений волновода «земля-ионосфера» и токов смещения в случае анализа поля по отдельно взятым компонентам – электрическим или магнитным.

Зондирования с контролируемыми источниками приобретают некоторое преимущество перед МТЗ при использовании промышленных линий электропередач (ЛЭП) в качестве излучающих антенн. В этом случае снимается проблема специального устройства и охраны питающих линий и заземляющих сооружений и в то же время существенно увеличивается (до сотен тысяч квадратных километров) площадь исследований при одной расстановке закрепленного источника. Однако при использовании длинных линий АВ необходимо учитывать недипольность установки, форму и расположение на местности силового кабеля с током и нелинейность протекания тока в нем, разную на разных частотах. Слабым местом зондирования с контролируемыми источниками является также сложность процедуры накопления сигналов на низких и сверхнизких частотах (0.1 Гц и ниже), необходимость, в которой возникает при изучении глубоко залегающих горизонтов в условиях хорошо проводящих сред. В этом случае резко увеличиваются требования к длительности времени накопления сигнала и одновременно повышаются требования к эргодичности поля, то есть к устойчивости случайного процесса естественных шумов, на фоне которых выделяется полезный сигнал.

С учетом изложенного неудивительно, что магнитотеллурический метод глубинного зондирования (МТЗ), где не требуется применения генераторов и питающих линий, захватил всю область интересов глубинной геоэлектрики, тогда как зондирования с мощными контролируемыми источниками стали редкими исключениями. Лишь структурные зондирования с источниками средней мощности на глубинах до 1-2 км, известные на западе как CSAMT методы [Goldstein & Strangway, 1975], более или менее успешно конкурируют с магнитотеллурическими зондированиями.

Однако быстрое развитие современной генераторной техники, создание новейших компьютерных технологий и разработка новых подходов в теории обработки и интерпретации результатов электромагнитных зондирования, наряду с совершенствованием аппаратной базы для регистрации сигналов позволяют успешно бороться с перечисленными выше проблемами как магнитотеллурики, так и зондирования с мощными контролируемыми источниками. Поэтому параллельное развитие этих двух направлений (CSEMS и МТЗ), конкурирующих и взаимно дополняющих друг друга, имеет большие перспективы для достижения успешных результатов.

Настоящая монография является обобщением результатов многолетних исследований авторов в области создания генераторной техники и измерительных приборов для глубинных зондирования с контролируемыми источниками. Начало этим исследованиям положили эксперименты с магнитогидродинамическим (МГД) генератором «Хибины» мощностью до 40 МВт [Велихов, Жамалетдинов, 2006] и с антенной ВМФ сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения «Зевс» мощностью порядка 2.5 МВт [Велихов, Жамалетдинов и др., 1994; Кононов, Жамалетдинов, 2002]. Использование МГД-генераторов в геофизике имеет большие перспективы, но их практическое применение ограничено, с одной стороны, их уникальностью и высокой стоимостью и, с другой стороны, ограниченным частотным диапазоном и отсутствием мобильности перемещения их в пространстве. В связи с этим, по инициативе Л.Б. Песина и при участии Ю.Д. Лисицына,

Л.А. Собчакова, Ю.М. Кононова, В.И. Жилинкова и ряда других сотрудников ведомства Дальней связи ВМФ РФ и НИИ ПТ были начаты разработки в области создания генераторов нового поколения. В период с 1993 по 2005 год были созданы и опробованы генераторы «Кола», «Ливадия» и «Энергия-1» мощностью до 100 кВт. С их применением был выполнен целый ряд успешных экспериментов по излучению крайне- и сверхнизкочастотных (КНЧ-СНЧ) колебаний для дальней связи с погруженными объектами [Кононов, Жамалетдинов, 2002] и для глубинного зондирования земли с применением промышленных ЛЭП [Жамалетдинов и др., 2005]. Быстрое развитие электронной техники за последние годы позволило существенно обновить конструкцию упомянутых выше генераторов и расширить их оперативные возможности. В последующие годы были созданы генераторы «Энергия-2» мощностью до 200 кВт [Баранник и др., 2009], «Энергия-2М» мощностью до 30 кВт с регулируемой диаграммой направленности [Barannik et.al., 2013] и портативный генератор «Энергия-3» мощностью 2кВт [Баранник и др., 2012]. Их описанию посвящены главы 4, 5 и 6, соответственно. В главе 7 рассмотрены вопросы согласования КНЧ генераторов с излучающими ЛЭП, а также проблемы электромагнитной совместимости КНЧ-СНЧ излучений с оборудованьями подстанций и с линиями связи.

Эффективность использования контролируемых источников напрямую зависит от совершенства измерительной техники, применяемой для регистрации полезных сигналов в пунктах проведения глубинных зондирований. Работа эта выполняется коллективом авторов настоящей книги параллельно с разработкой генераторов и с учетом перспектив их практического использования. Авторами выполнена работа по созданию семиканальной цифровой измерительной станции «КВВН-7». Отдаленным прототипом этой станции явилась одноканальная аналоговая станция частотного зондирования на мостовых фильтрах, разработанная еще в начале 60-х годов прошлого века Б.С. Эненштейном и А.П. Ивановым (1961) и переделанная позднее в четырехканальную аналого-цифровую станцию СЧЗ-95 А.Н. Васильевым, С.А. Носковым и А.Д. Токаревым [Токарев и др., 1997]. В станции КВВН-7 от прежней станции СЧЗ-95 фактически остались только индукционные датчики, изготовленные в Нижегородском радиофизическом институте (НИРФИ). Описанию станции КВВН-7 посвящена глава 8.

Вся работа по созданию генераторов и по разработке измерительной техники происходила в тесной связи с проведением полевых экспериментальных исследований, выполнявшихся, главным образом, по плану грантов РФФИ. Описанию результатов этих исследований посвящена заключительная 9-я глава.

Необходимо отметить, что авторство настоящей монографии не ограничивается лицами, поименованными на титуле и на заключительной странице обложки. При составлении книги использованы статьи, написанные с участием к.т.н. В.Н. Селиванова, к.ф.-м.н. А.Н. Шевцова, ведущих инженеров и программистов П.И. Прокопчука, Д.В. Куклина и Т.Г. Коротковой. Их вклад отмечен на следующей странице, где приведены цветные фотографии коллег и перечислены совместные публикации согласно списку литературы, приведенному в конце монографии.

#### Список литературы

Баранник М.Б., Данилин А.Н., Ефимов Б.В., Колобов В.В., Прокопчук П.И., Селиванов В.Н., Копытенко Ю.А., Жамалетдинов А.А. (2009). Высоковольтный выпрямитель генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений // Сейсмические приборы. 2009б. Т. 45. № 3. С. 5-13.

Баранник М.Б., В.В. Колобов, А.Н. Шевцов, А.А. Жамалетдинов (2012). Генераторно-измерительный комплекс направленного действия “Энергия-2м” для сейсмического мониторинга и зондирования рудных объектов // Сейсмические приборы, 2012. Т. 48, № 4. С. 67-80.

Баранник М.Б., В.В. Колобов, В.Н. Селиванов, Д.В. Куклин, А.А. Жамалетдинов, А.Н. Шевцов(2012). Портативный генератор для глубинного зондирования и мониторинга сейсмоактивных зон с применением промышленных линий электропередачи // Сейсмические приборы, 2012. Т. 48, № 4, с. 67-80

Бердичевский М.Н. (1968). Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 255 с.

Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. (1994). Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ - диапазона. // Доклады Академии Наук. Т. 338, №1, С. 106-109, 1994.

Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А. (2006). К 30-летию МГД-эксперимента "Хибины" (обзор глубинных геоэлектрических исследований с мощными контролируруемыми источниками) / Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах. Книга 1. Изд-во КНЦ РАН, 2006. С. 60-64.

Жамалетдинов А.А., Короткова Т.Г., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Невретдинов Ю.М., Зархи И.М., Копытенко Ю.А., Копытенко Е.А., Гохберг М.Б., Песин Л.Б., Шершнева Ю.А. (2005). Сверхглубинное зондирование литосферы Балтийского щита с применением промышленных ЛЭП. // ДАН, 2005, том 405, №5. С. 666-669.

Кононов Ю.М., Жамалетдинов А.А. (2002) Системы СНЧ-радиосвязи и мониторинга среды: перспективное направление конверсионной политики России. М.: "ИНФОРМОСТ" - "Радиоэлектроника и Телекоммуникации". 2002. С. 4-6.

Токарев А.Д., Жамалетдинов А.А., Васильев А.Н. (1997). Измерительный комплекс для глубинных

электромагнитных зондирований земной коры с контролируемыми источниками поля. // Приборы и методика геофизического эксперимента. Мурманск. Изд. КНЦ РАН, 1997. С. 85-90

Эненштейн Б.С., Иванов А.П. (1961). Станция для частотного зондирования. // Вопросы теории и практики электрометрии. Изд. АН СССР, М., 1961.

Goldstein, M. A. and Strangway, D. W. (1975). Audio Frequency Magnetotellurics with a Grounded Electric Dipole Source. // Geophysics 40, 669-683.

---

## Глава 5. СНЧ радиопередающая установка «ЗЕВС» двойного назначения в научно-популярных изданиях, докладах и воспоминаниях участников.

**Жамалетдинов А.А. (1995). Перспективы и первые результаты глубинных электромагнитных зондирований с применением низкочастотных радиостановок // Доклад на Президиуме РАН, г. Москва, 12 декабря 1995 года.**

Геологический институт Кольского научного центра РАН, abd.zham@mail.ru

Мощные радиостановки СНЧ-диапазона являются эффективным средством связи с погруженными объектами. Первые две такие установки были созданы в начале 70-х годов в США и СССР. В США - это установка "Сангвин", расположенная в районе Великих Озер. Ее рабочая частота - 76 Гц. В России - это установка "Зевс", расположенная на севере Кольского полуострова. Ее рабочая частота - 82 Гц. Основным преимуществом СНЧ-антенн является то, что электромагнитное поле в диапазоне ниже 100 Гц распространяется в дальней зоне с крайне низким затуханием порядка 1.5 дБ/1000 км. Они практически не подвержены влиянию магнитных бурь, неоднородности ионосферы и рельефа земной поверхности. На своем пути СНЧ-волны распространяются в виде  $TE$ -моды ( $E_z/H_x$ ) и проникают в стенки волновода на толщину скин-слоя. Эта глубина тем больше, чем больше длина волны. От установки Сангвин сигналы зарегистрированы на глубинах до 100 м в Мировом океане. Установки "Сангвин" и "Зевс" обеспечивают систему практически глобальной связи с погруженными субмаринами на удалении до 8-10 тыс. км. Однако эти достоинства СНЧ-антенн стоят достаточно дорого. Большие длины волн требуют сооружения громоздких антенн с линейными размерами в десятки и до ста километров. При этом может быть обеспечена лишь односторонняя связь. Большие потери при измерении требуют применения мощных источников. Достаточно сказать, что в системе "Сангвин", при потребляемой мощности 3,9 МВт, излучаемая мощность составляет лишь 60 Вт. Существенным недостатком СНЧ-антенн является также крайне низкая скорость передачи информации - порядка 1 б/с на удалении в 10 тысяч км. Отмеченные недостатки, а также широкое развитие других, альтернативных средств связи, привело к тому, что СНЧ-антенны не получили широкого развития в технике дальней связи ВМФ России. Установка "Зевс" по настоящее время является уникальным действующим объектом этого направления.

Еще на стадии проектирования установки "Зевс" для выбора площадок под заземление и трассы воздушных ЛЭП здесь проводились геоэлектрические исследования с естественными и контролируемыми источниками и, прежде всего, методом ВЭЗ. Эти работы продолжались и впоследствии для уточнения излучающих параметров антенны. Этими исследованиями руководили профессор Санкт Петербургского университета А.В. Вешев и доцент А.В. Яковлев. В 1990 году впервые была обозначена проблема использования СНЧ-антенны "Зевс" в научных и прикладных целях в рамках программы "Конверсия" для задач глубинного зондирования земной коры и изучения глубинного строения рудных полей. В своем докладе я остановлюсь, главным образом, на первых результатах, полученных нами в этом направлении, и коротко освещу возможные перспективы использования "Зевса" в экологии, сейсмопрогнозе и при исследовании волноводных свойств ионосферы. Конечной целью доклада является попытка обосновать целесообразность создания двухцелевой установки на базе антенны "Зевс" для решения мирных задач, сохраняя и, может быть, даже усиливая при этом возможности антенны для работы ее по прямому назначению в рамках Центра дальней связи ВМФ России.

Исследования с антенной "Зевс" явились прямым продолжением программы глубинных электромагнитных зондирований с МГД-генератором "Хибины" мощностью 80 МВт. Эта программа выполнялась по инициативе и под научным руководством академика Е.П. Велихова. Результаты МГД-зондирования позволили составить схему блоковой структуры электропроводности земной коры Кольского полуострова и Северной Карелии, разработать модель глубинного строения литосферы и оценить характер ее электропроводности до глубин 100-150 км. Рабочие разности между источником и приемником достигали при этом 700 км. Однако, низкочастотный спектр сигналов источника "Хибины" (от 0.05 до 1 Гц) не позволил выполнить детальное исследование электропроводности земной коры в среднем диапазоне глубин от единиц до первых десятков километров. Поэтому наши интересы обратились к источнику "Зевс".

Выгодными отличиями источника "Зевс" являются: - его расположение в пределах однородного плохопроводящего Мурманского блока; правильная геометрия (две прямолинейные, заземленные по концам линии длиной 55 и 60 км, которые могут работать как раздельно, так и вместе); заданная с высокой точностью синусоидальная форма тока; возможность прецизионного измерения силы тока и, наконец, большая мощность питающих генераторов, достигающая на входе каждой из двух антенн до 2,5 МВт. Частотный диапазон антенн от 30 до 200 Гц обеспечивает максимальную глубинность исследований 12-15 км в условиях средних значений сопротивления коры  $4 \cdot 10^4$  Ом·м. На первом этапе в 1990-91 гг. была выполнена серия глубинных зондирований на постоянном (импульсном) токе путем подключения к антенне "Зевс" внешнего источника - генераторы ЭРС-67 мощностью 26 кВт. Результаты этих исследований позволили построить сводную с МГД-данными кривую геометрического зондирования до разности 330 км и оценить проводимость фундамента до глубины 35-40 км,

т.е. до раздела Мохо. Поперечное сопротивление коры при этом оценивается величиной порядка  $2 \cdot 10^9$  Ом·м<sup>2</sup> при среднем значении удельного электрического сопротивления земной коры  $10^5$  Ом·м. В этот же период была выполнена серия экспериментов по глубинному зондированию в Панско-Цагинской платиноносной провинции. В этом случае исследования выполнялись в режиме частотного зондирования. Ток в антенну "Зевс" подавался также от генгруппы ЭРС-67 в диапазоне частот 1-1000 Гц. Здесь в разрезе земной коры был зафиксирован ряд тонких проводящих слоев на глубинах 2-7 км, полого падающих на север. Наблюдается неплохое совпадение положения верхнего проводящего слоя на глубине порядка 2 км с зоной титано-магнетитового и магнетитового оруденения в районе платиноносной провинции.

Наибольшие интересы для глубинных исследований связываются с возможностью использования основной силовой установки "Зевс". В связи с этим в 1992 году был предпринят эксперимент по глубинному зондированию на южной окраине Балтийского щита с использованием антенны "Зевс" на удалении до 1100 км. Затем эта работа была продолжена в Северной Карелии в 1993 году. Одной из главных особенностей полученных результатов явилось сильное влияние ионосферного волновода, приведшее к увеличению амплитуды поля примерно в 10 раз по электрическим и магнитным компонентам, в сравнении с рассчитанными параметрами в отсутствии ионосферы. Это завышение довольно точно совпало с теоретическими оценками увеличения энергии связи в волне нулевого порядка с помощью соотношения  $\lambda/4h$ , где  $\lambda$  - длина волны в воздухе и  $h$  - высота ионосферы. Нормировка по импедансу, в соответствии с граничными условиями Леонтовича, позволяет в значительной мере устранить влияние ионосферы и получить значения кажущегося сопротивления, адекватно отражающие электропроводность нижнего полупространства. Сопоставление полученных результатов с данными глубинных зондирований Балтийского щита в поле естественных и контролируемых источников показывает их хорошее согласие. Таким образом, результаты испытаний показали, что с использованием установки "Зевс" имеется принципиальная возможность проведения глубинных геоэлектрических исследований на всей территории Балтийского щита и прилегающей части Баренцевоморского шельфа. Примерные границы зоны уверенного приема установлены с ориентировкой на параметры измерительной станции, разработанной для этой цели в Геологическом институте КНЦ РАН совместно с Полярным геофизическим институтом КНЦ РАН. Измерения выполняются с помощью трех индукционных датчиков, устанавливаемых в направлениях север-юг, восток-запад и вертикально. С датчиков сигналы поступают на блоки сопряжения, где происходит фильтрация промышленной частоты 50 Гц и ее первых двух гармоник 100 и 150 Гц, гальваническая развязка на оптронах и предусиление. Затем сигналы поступают на основной измерительный блок, где осуществляется гетеродинирование и фильтрация разностной частоты 1 Гц. После этого аналоговый сигнал преобразуется в цифровой с помощью линейного 20-разрядного АЦП и записывается по Note Book 486 DX. Для записи низкочастотных сигналов, ниже 1 Гц используются кварцевые магнитометры. Примененная аппаратура далека от совершенства. Имеются значительные возможности для улучшения ее характеристик и, соответственно, для расширения схемы дальнего действия антенны СНЧ-диапазона "Зевс" при решении геофизических задач - глубинного зондирования и геоэлектрического картирования территорий.

В заключение своего сообщения я коротко остановлюсь на перспективах разработки на базе антенны "Зевс" двухцелевой установки, т.е. установки, в которой решение прямой задачи связи с подводными лодками совмещалось бы с решением народнохозяйственных задач - по геофизике, экологии, сейсмопрогнозу и исследованию свойств ионосферы. Основные задачи глубинных электромагнитных зондирований на Балтийском щите показаны ниже в виде блок-схемы. Антенная система "Зевс" в ее современном состоянии, т.е. в СНЧ-диапазоне (30-200 Гц) может быть использована при решении задач 1,2 и, частично, 3. Перспективы расширения возможностей установки "Зевс" связаны с выходом в КНЧ-диапазон (от 30 до 0.1 Гц). Актуальность проблемы глубинных зондирований определяется очевидной необходимостью разработки единой непротиворечивой модели строения литосферы Балтийского щита по данным зондирований с естественными и мощными контролируемыми источниками. Весьма перспективной представляется возможность использования антенны "Зевс" для изучения Баренцевоморского шельфа с целью прогнозирования нефте-газо-перспективных территорий. Расчеты показывают, что дальность уверенного приема при расположении датчиков на дне моря может достигать 200 км. Проблема глубинных зондирований земной коры на больших удалениях от источника тесно связана с необходимостью учета влияния ионосферы. Расчеты показывают, что на частоте 100 Гц это влияние необходимо учитывать, начиная с разности 100 км и больше. Эти исследования могут иметь важное значение для исследования свойств ионосферы и особенностей распространения СНЧ- и КНЧ-волн в волноводе «Земля-ионосфера». Перспективы использования антенны "Зевс" в экологии связаны с поисками монолитных блоков земной коры для захоронения радиоактивных остатков. Эта проблема тесно связана также с проблемой поиска монолитных блоков земной коры под сейсмостойкое строительство. Опыт работ с МДГ-источником "Хибины" показывает, что эти задачи наиболее надежно решаются в поле закрепленного удаленного источника. В этом случае удастся распознавать монолитные блоки земной коры, связанные с выходами протофундамент и уходящие "корнями" на большую глубину, от локальных, относительно молодых плохопроводящих куполовидных блоков гранитоидов, "плавающих" в супракрустальном субстрате, и являющихся поэтому потенциально более сейсмоопасными. Наконец, отдельным блоком выделяется крупная и представляющая несомненный интерес проблема использования антенной системы "Зевс" для изучения предвестников землетрясений. Я не являюсь специалистом в этой области, но, насколько мне известно, надежных критериев

предсказания землетрясений по данным геоэлектрики, как впрочем, и по данным сейсмических наблюдений, нет. Тем не менее, работы в этом направлении ведутся с использованием всех доступных методов, и отдельные успешные предсказания имеются, в том числе и по данным электромагнитных измерений, например, на Гармском и Фрунзенском геодинимических полигонах.

Сама установка "Зевс" расположена в зоне низкой сейсмической активности. Ближайшими объектами, представляющими интерес с точки зрения мониторинга сейсмобезопасности, являются Кольская АЭС, расположенная в зоне влияния Кандалакшского грабена, и АЭС Лесной Бор в Ленинградской области. Более удаленные объекты расположены в зоне слабого воздействия источника "Зевс". Тем не менее, результаты экспериментальных наблюдений позволяют считать, что уверенное обнаружение сигналов возможно на большей части территории России. Наиболее перспективными измерительными приборами для этих измерений являются станции серии АКФ-2 и АКФ-4, разработанные в Институте земной коры Санкт Петербургского университета под руководством М.И. Пертеля. Наряду с этим при разработке высокочувствительных измерительных систем необходимо использовать имеющийся богатый опыт ВМФ. В связи с необходимостью изучения сигналов, проникающих достаточно глубоко в земную кору, по крайней мере, до глубины очаговых зон, расположенных, как правило, под довольно мощными проводящим осадками, здесь возникает отмечавшаяся выше необходимость в расширении частотного диапазона антенной системы "Зевс" путем создания КНЧ-генератора в диапазоне 30-0.01 Гц. Но эти вопросы выходят за рамки моего доклада; они являются предметом рассмотрения в докладе моего коллеги Собчакова Леонида Авраамовича.

В заключение доклада хочу выразить благодарность руководству Центра дальней связи ВМФ России и, прежде всего Кононову Юрию Михайловичу за поддержку в проведении исследований. Благодарю Членов Президиума и приглашенных участников заседания за внимание.

---

---

### ***Блинова Алина (1995). «Зевс» двойного применения // «Поиск», № 50. 1995. С.2***

Более двадцати лет назад было выяснено, что волны на частотах менее 100 Гц затухают очень медленно, поэтому распространяются на большие расстояния. К тому же такие волны обеспечивают очень устойчивую связь: они не зависят ни от состояния атмосферы, ни от магнитных бурь.

В свое время низкочастотными установками очень заинтересовался американский, а потом российский военно-морской флот. Однако наряду с достоинствами такие установки имели не менее очевидные недостатки. Для того, чтобы возбудить очень длинные волны, необходимо устанавливать громоздкие антенны. К тому же на излучение на сверхнизких частотах тратится очень много энергии. Поэтому низкочастотные установки не получили широкого распространения.

Исследования в области сверхнизких частот едва не закрылись. Однако, как сообщил, выступая с научным докладом на заседании президиума РАН, доктор геолого-минералогических наук А. Жамалетдинов, единственную в стране установку «Зевс», к счастью, еще не сдали в металлолом. Ее используют для глубинного электромагнитного зондирования Земли с целью прогноза землетрясений, проверки качества окружающей среды, изучения ионосферы. Предполагается использовать ее даже для прогноза состояния атомных электростанций, в частности ЛАЭС. Одновременно ученые рассматривают возможности установки в военно-морском флоте.

---

---

### ***Жамалетдинов А.А. (1996). "Зевс" на службе у моряков и геофизиков. // Газета «Полярная правда» от 05.03.1996 (по материалам газеты «Поиск»)***

Геологический институт Кольского научного центра РАН, abd.zham@mail.ru

В газете "Поиск" от 22.12.1995 появилась заметка "Зевс" двойного назначения", в которой сообщается о новом мощном источнике электромагнитного поля "Зевс", который расположен на Кольском полуострове и используется для задач ВМФ и для глубинного зондирования Земли. С просьбой прокомментировать это сообщение мы обратились к заведующему лабораторией геоэлектрики Геологического института Кольского научного центра Российской академии наук доктору геолого-минералогических наук Жамалетдинову Абдулхаю Азымовичу, сделавшему соответствующее научное сообщение на Президиуме Российской Академии Наук.

**Ред.** Что это за источник "Зевс"?

**А.А.** Ничего сверхъестественного. Это немного необычная высоковольтная линия электропередачи протяженностью чуть меньше 100 км, заземленная по обоим концам в скальный грунт. Специальная мощная энергетическая установка генерирует в ней ток в заданном диапазоне частот. Свойства излучаемого электромагнитного поля таковы, что оно распространяется на многие тысячи километров вдоль земной поверхности и проникает глубоко в земную кору и под поверхность мирового океана.

**Ред.** Чем определяются эти свойства?



**А.А.** Они определяются, прежде всего, частотой электромагнитного поля. В отличие от обычных радиостанций, работающих на частотах в десятки тысяч герц и выше, система "Зевс" может работать в диапазоне сверхнизких частот, ниже 100 Гц. На этих частотах электромагнитные волны распространяются в волноводе "Земля-Ионосфера" с крайне низким затуханием порядка 1.5 децибел на каждую тысячу километров удаления. Они практически не подвержены влиянию магнитных бурь, неоднородности ионосферы и рельефа земной поверхности.

**Ред.** Имеются ли аналоги "Зевса" за рубежом?

**А.А.** В начале 70-х годов велась конкурентная борьба в этой области. В частности, для задач ВМФ США была спроектирована аналогичная систем "Сангвин". Однако из-за дороговизны антенны эти исследования остановились на стадии создания отдельных экспериментальных установок, действовавших в районе Великих Озер. Таким образом, антенна "Зевс" является в этом отношении уникальным объектом.

**Ред.** Почему именно Геологический институт участвует в этой работе?

**А.А.** Геологический институт КНЦ РАН в течение многих лет ведет разработку проблемы глубинных электромагнитных зондирований литосферы Земли с использованием мощных контролируемых источников. В частности, в "Полярке" неоднократно публиковались результаты наших исследований с источником "Хибины" - импульсным МГД-генератором мощностью 80 мегаватт, установленным на Рыбачьем полуострове, работы с промышленной ЛЭП постоянного тока Волгоград-Донбасс и другие. Работы с установкой "Зевс" являются прямым продолжением этих исследований, но в то же время источник "Зевс" в сравнении с источником "Хибины" обладает рядом преимуществ. Он расположен в пределах однородного плохопроводящего массива, имеет правильную геометрическую форму, на выходе излучает мощный гармонический сигнал с точными, заранее заданными характеристиками. Следует отметить, что эти исследования мы выполняем совместно с целым рядом других научно-исследовательских и военных организаций, прежде всего, с Российским институтом мощного радиостроения и Институтом земной коры Санкт-Петербургского университета.

**Ред.** Какую конечную цель вы ставите?

**А.А.** Конечной задачей работ является создание двухцелевой установки на базе антенной системы "Зевс", которая бы позволяла решать задачи дальней связи для Военно-морского флота и обеспечивала бы решение мирных задач научного и прикладного значения. Эта программа укладывается в поддерживаемую Правительством политику конверсии ВПК по бинарной схеме.

**Ред.** Какое значение для фундаментальной науки имеют исследования с источником "Зевс"?

**А.А.** Известно, что на Кольском полуострове пробурена самая глубокая в мире скважина. Но ведь в масштабах Балтийского щита это всего лишь одиночный укол, правда, весьма чувствительный (все-таки глубина - 12.262 км). Чтобы распространить данные Кольской сверхглубокой на большие площади и, что особенно важно, на большие глубины, необходима хорошая геофизика и, в частности, геоэлектрика. Источник "Зевс" позволяет исследовать глубины до 50 и 100 км, причем на больших площадях. С помощью разработанной в Геологическом институте измерительной станции мы показали возможность проведения таких исследований на большей части территории Балтийского щита. Данные геоэлектрики в комплексе с другими методами позволяют оценивать температуру на глубине, флюидный режим земной коры, трещиноватость и анизотропию. Все это позволяет лучше узнать строение планеты, на которой мы живем.

**Ред.** Трудно удержаться и не задать вопрос, а какое практическое значение имеют эти работы?

**А.А.** Диапазон практического применения геоэлектрических исследований с установкой "Зевс" чрезвычайно широк. Прежде всего, это, конечно, изучение глубинного строения рудных полей, прогнозирование рудоперспективных территорий. Причем наиболее эффективно эти работы могут проводиться в пределах Мурманской области, где мощность сигналов "Зевса" в земле особенно велика. Первые положительные результаты нами получены в пределах Панской платиноносной провинции.

Результаты расчетных и экспериментальных работ показывают широкие возможности использования источника "Зевс" для изучения нефтеперспективных территорий на прилегающей части Баренцевоморского шельфа. Кроме того, с применением источника "Зевс" открываются новые возможности для поиска площадок под сейсмостойкое строительство и для захоронения радиоактивных отходов. Излучаемая мощность антенны "Зевс" столь велика, что при использовании современных чувствительных приемников имеется возможность проводить электромагнитный мониторинг за состоянием электропроводности земной коры в любой точке на территории СНГ. Это, в свою очередь, открывает широкие перспективы использования источника "Зевс" для прогноза землетрясений. Первый успешный опыт таких работ был осуществлен в декабре 1995 года на Северном Кавказе группой НИИЗК СПбГУ по заданию Министерства чрезвычайных ситуаций.

---

---

**Кононов Ю.М.(1996). Связь на военно-морском флоте. //Радио, № 10, 1996. С. 10-11.**

Военно-Морской Флот, [yurij.kononov.1947@mail.ru](mailto:yurij.kononov.1947@mail.ru)

### **К 300-летию российского флота**

В октябре нынешнего года Российскому флоту исполняется три столетия. Вся история его становления и развития неразрывно связана с использованием и совершенствованием связи как важнейшего средства

управления кораблями. От примитивных средств зрительной передачи и приема сигналов в эпоху основателя нашего флота Петра I, первых опытов применения радиосвязи на флоте русским ученым А. С. Поповым в 1897 г., который в самом начале двадцатого века руководил работами по оснащению кораблей станциями беспроволочного телеграфа, до глобальных средств радио- и космической связи наших дней - таков путь, пройденный флотскими связистами.

В этом номере редакция предоставляет слово начальнику связи ВМФ вице-адмиралу Юрию Михайловичу Кононову.



Современный Военно-Морской Флот - один из важнейших видов Вооруженных Сил страны, силы и войска которого предназначены для действия в различных средах Мирового пространства - на воде, под водой и в воздухе, зачастую на значительном удалении от своих баз.

Для эффективного управления силами и войсками создана и функционирует система управления ВМФ. Она базируется на последних достижениях радиоэлектроники, вычислительной техники, образуя сложные функциональные автоматизированные комплексы.

Наиболее сложной и уникальной в общей системе управления ВМФ является ее основная составляющая - система связи. Именно она обеспечивает управление силами в оперативно важных районах Мирового океана, включая арктические районы, в том числе и подводными ракетносцами на значительных глубинах.

Если представить себе систему связи ВМФ, то она будет выглядеть как разветвленная сеть узлов связи различных уровней управления: территориально разнесенные мощные стационарные передающие и приемные радиоцентры, центры связи через космические аппараты, комплексы средств связи на подводных лодках, надводных кораблях, самолетах и вертолетах.

Для связистов ВМФ сложнейшая задача - обеспечение связи с погруженными в водные глубины и находящимися подо льдом подводными лодками. Это направление наиболее актуальным стало в послевоенные годы, когда флот пополнился подводными лодками, рассчитанными на длительное автономное плавание. Речь идет, прежде всего, об атомных ракетных субмаринах с неограниченной дальностью и длительностью похода. Естественно, что для связи с ними потребовалась организация принципиально новых радиолиний. Необходимо обеспечивать передачу на их борт приказов практической в любой точке Мирового океана, причем в кратчайшее время и с высокой вероятностью, как у нас говорят, "с первой передачи".

Сегодня эти проблемы удалось решить на основе комплексного использования каналов связи различных диапазонов радиоволн - от сверхнизкочастотных (СНЧ) - десятки-сотни герц - до высокочастотных (ВЧ) - сотни мегагерц.

Остановимся, прежде всего, на радиолиниях, работающих в СНЧ и сверхдлинноволновом (СДВ) диапазонах, являющихся основными для связи с лодками в погруженном состоянии. Эти радиоволны обладают наибольшей проникающей способностью в проводящей среде - морской воде. Распространяются они в своеобразном сферическом волноводе, образованном ионосферой и поверхностью Земли, и имеют малое затухание порядка одного децибела на 1000 км. Электромагнитные поля в этих диапазонах достаточно стабильны и сохраняют свои параметры при искусственных и естественных ионосферных возмущениях.

Радиостанции в силу особенностей СНЧ диапазона размещаются в районах с низкой электропроводностью почвы. Их подводимая к антеннам мощность составляет несколько мегаватт. Весьма своеобразны используемые на передающих центрах СНЧ связи антенны. Они горизонтальные, низко расположенные, с заземлением на концах и чем-то напоминают линии высоковольтных передач. Такие антенные системы формируют электромагнитное поле в канале "земля - ионосфера" аналогично горизонтальному магнитному диполю, площадь которого определяется длиной антенны и величиной скин-слоя в подстилающей поверхности.

Прием на подводной лодке с передающего СНЧ радиоцентра осуществляется на магнитные антенны, расположенные в надстройке лодки, или на специальные буксируемые устройства. Расположенные в надстройке антенны обеспечивают прием на малых глубинах и при нахождении лодки подо льдами. Буксируемые антенны рассчитаны на прием на глубинах в сотни метров от поверхности воды. При этом буксируемый носитель антенны находится в приповерхностном слое, за счет чего и обеспечивается "энергетический контакт" с передающим радиоцентром.

Новые разработки, которые ведутся в научно-исследовательских организациях ВМФ, часто выходят за рамки лишь военных интересов. Они относятся к так называемым технологиям двойного применения и с успехом могут быть использованы в науке, промышленности, сфере обслуживания и других областях. Развитие системы связи ВМФ стимулировало начало ряда работ, связанных с конверсией и технологиями двойного применения. К ним, например, относятся электромагнитный мониторинг сейсмотектонических процессов в земной коре для прогнозирования землетрясений, использование радиоизлучений крайне низких частот для поиска полезных ископаемых.

По этим направлениям Президиум РАН принял решение разработать федеральную программу, которая будет осуществляться в интересах ряда гражданских организаций и одновременно в интересах ВМФ. Это далеко не единственный пример использования опыта, накопленного связистами ВМФ для мирных целей. Здесь и разработанная технология подъема, проверки и восстановления старых подводных кабельных магистралей связи, и специальный математический аппарат проектирования новых кабельных линий, и пути модернизации существующих и строительства новых кабельных судов и донного оборудования прокладки. В качестве конверсионного варианта строительства такого судна связисты ВМФ предложили использовать атомные подводные лодки, выводимые из состава флота в соответствии с договором об ограничении стратегических наступательных вооружений. Весьма полезными могут оказаться разработанные и используемые на флоте средства автоматизации приема информации о возникновении аварийных ситуаций.

Немало и других проблем, для решения которых целесообразно объединить усилия специалистов ВМФ и других ведомств. В частности, например, речь идет о совместной эксплуатации национальной системы морской подвижной службы связи. Связисты ВМФ готовы также и в дальнейшем использовать научно-технический задел, созданный в процессе решения чисто военных задач, в интересах народного хозяйства России.

В наши дни развитие связи ВМФ, несмотря на трудности общего экономического характера, продолжается. Оно направлено, прежде всего, на совершенствование управления силами ВМФ России, повышение степени автоматизации процессов связи, интеграцию услуг на основе внедрения новейших достижений в области обработки сигналов, более широкое использование перспективной вычислительной техники и освоение новых диапазонов электромагнитного спектра.



Тяжелый атомный крейсер "Адмирал Нахимов", Северный флот

---

---

***Svanhovd Environment Centre (1997). Svanvik, Norway, March.1996. Information about electric line "ZEVS". // "Polarnaya pravda", 7.03.1996***

Svanhovd Environment Centre Svanvik Norway

The Chief of the Geoelectric laboratory of the Geological institute of the Kola Science Centre RAS A.A. Zhamaletdinov reported about use of 100 km electric line "ZEVS" with grounded ends to study deep structure of the Earth and to make seismological forecasts. The electric power installation generates high-tension current. Electric and magnetic field spreads to thousands of kilometres along the land stratum and penetrates deep into the crust and under surface of the World ocean. During many years the Institute develops deep electric and magnetic probations of Earth lithosphere, using powerful control sources. The main object of the investigations is to build the installation on the basis of aerial system ZEVS to solve problems of the far link of the Navy and to fulfil scientific tasks. The Institute carries out all the investigations together with the Institute of Radio Construction and the Institute of the Crust in Snt.-Petersburg.

---

---

**Кононов Ю.М.<sup>1</sup>, Жамалетдинов А.А.<sup>2</sup> (2002). Системы СНЧ-радиосвязи и мониторинг среды - перспективное направление конверсионной политики России. // М. Информмост "Радиоэлектроника и телекоммуникации", 2002, № 21, С. 4-6.**

<sup>1</sup>Военно-Морской Флот, yurij.kononov.1947@mail.ru

<sup>2</sup>Геологический институт Кольского научного центра РАН, abd.zham@mail.ru

Идея сверхнизкочастотной радиосвязи (далее СНЧ-радиосвязи) возникла в начале 60-х гг. прошлого века. Основное преимущество СНЧ-радиоволн заключается в их малом затухании в сферическом волноводе «Земля-ионосфера» (порядка 2-3 дБ/1000км) и слабой зависимости параметров их распространений от рельефа и магнитных бурь. Этот тип радиосвязи наиболее стабилен по сравнению с обычной высокочастотной радиосвязью.

#### **От «Зевса» и «Сангвина» к земным проблемам.**

Основным преимуществом СНЧ-радиосвязи, привлечшим внимание военно-морских специалистов, стала возможность ее использования для связи с погруженными объектами. Благодаря значительной длине СНЧ-радиоволны, достигающей 3000 км в воздушном пространстве, электромагнитное поле глубоко проникает в стенки волновода "Земля-ионосфера". В морскую воду поле может проникать до глубины 60-70 м на частоте 50 - 100 Гц. (Для сравнения: сверхдлинноволновые радиостанции могут обеспечить проникновение электромагнитного поля в морскую воду лишь до глубины 2-3 м.)

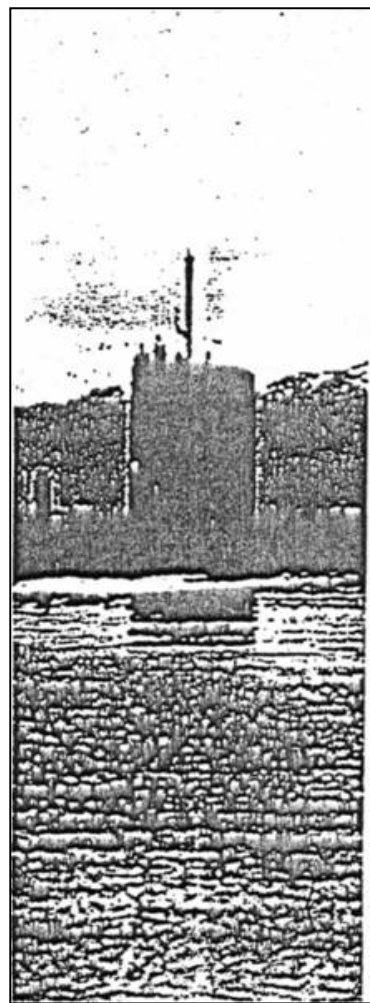
В начале 1970-х гг. в США и бывшем СССР, практически одновременно, были созданы две СНЧ-радиостанции для связи с подводными лодками - "Зевс" и "Сангвин". Широко разрекламированная система СНЧ-радиосвязи США, расположенная в районе Великих озер, не получила дальнейшего развития по экономическим соображениям. Расположенная на Кольском полуострове антенна "Зевс" - единственный действующий объект этого типа. Антенна представляет собой две параллельные линии электропередачи длиной 60 км каждая, которые питаются от двух свич-генераторов синусоидального напряжения, установленных у ближних заземлений. Передатчик обеспечивает ток в антеннах до 200 - 300 А в диапазоне частот от 20 до 200 Гц [Велихов и др., 1994 г.]. Синусоидальный ток в антеннах может задаваться на сетке частот с шагом в 0.1 Гц. Частота задающего генератора определяется системой "Гиацинт" с точностью не хуже  $10^{-7}$ .

Антенна "Зевс" расположена на мурманском кристаллическом блоке архейского возраста. Земная кора в этом районе отличается крайне высоким сопротивлением, достигающим  $10^5$  омметров на глубинах 10-15 км. Факт этот благоприятен, так как обеспечивает высокий магнитный момент источника "Зевс" - порядка  $1.5 \cdot 10^{11}$  Ам<sup>2</sup>. На рис. 1 приведена теоретически рассчитанная схема изолиний полного горизонтального магнитного поля на частоте 100 Гц при силе тока в антенне 300 А.

Штриховкой выделены основные сейсмоопасные районы бывшего СНГ, представляющие интерес для электромагнитного мониторинга с целью прогноза землетрясений. На схеме изолиний можно видеть, что магнитное поле изменяется от  $\sim 0.05 - 0.07$  пикатесла в сейсмоопасных районах Северного Кавказа до  $\sim 0.04$  пикатесла в районе действующих вулканов на Камчатке. Современная спецаппаратура способна регистрировать эти сигналы. Во многих пунктах на территории СНГ (во Владивостоке, Забайкалье, Крыму и на Кавказе) уже проводились соответствующие записи СНЧ-сигналов. Полученные амплитуды поля близки к представленным на рис. 1.

Установка "Зевс" в настоящее время является уникальным объектом СНЧ-радиосвязи. Очевидные ее преимущества, однако, не вполне бесспорны. Нужно указать на односторонний характер связи, поскольку большие длины волн предполагают сооружение громоздких антенн с линейными размерами в десятки (до одной сотни) километров. Значительные потери при излучении требуют использования мощных источников. Коэффициент преобразования составляет  $10^{-5}$ , а это значит, что на каждый ватт излучаемой энергии необходимо затратить до 100 кВт энергии генераторов.

Стремительное развитие компьютеризированных средств цифровой обработки информации, а также появление новейших маломощных антенн для регистрации слабых сигналов и широкие возможности использования спутниковых систем синхронизации сигналов источника и приемников, предопределяют новые



направления в развитии СНЧ-радиосвязи. При этом основные перспективы связываются с разработкой систем многоцелевого назначения, ориентированных, с одной стороны, на дальнейшее развитие возможностей СНЧ-систем для их работы по прямому назначению в интересах дальней связи ВМФ России, а с другой - на решение задач фундаментальной и прикладной геофизики.

Диапазон практического применения радиоантенны «Зевс» чрезвычайно широк: это, прежде всего, изучение глубинного строения земной коры и отдельно взятых рудных полей, а также нахождение перспективных в смысле поиска рудных и нефтяных месторождений.

Возможности для исследований обусловлены большой глубиной проникновения СНЧ-волн в земную кору - порядка 10-15 км. Успешные эксперименты проводились в Карело-Кольском регионе и в Южной Финляндии. С помощью электромагнитного поля источника "Зевс" может быть создана беспроводная подземная радиосвязь, исследованы свойства ионосферного волновода, проведен поиск мест для захоронения радиоактивных отходов, а также изучено напряженное состояние земной коры, горных ударов и даже предсказаны землетрясения. Особенность такой многоцелевой установки с излучателем высокой мощности в возможности решать разноплановые задачи одновременно в разных регионах, по синхронной программе пусков источника "Зевс", согласованной со всеми заказчиками работ. Рентабельность такой установки напрямую зависит от числа потребителей.

#### СНЧ-мониторинг как средство для изучения динамики земных недр и прогноза землетрясений.

Одно из наиболее перспективных направлений использования СНЧ-радиоустановки "Зевс" по линии конверсии - это проведение электромагнитного мониторинга, то есть долговременных систематических наблюдений на отдельных объектах с целью выявить динамику развития тех или иных процессов в среде. При этом может проводиться прогнозирование горных ударов в рудниках и изучение предвестников землетрясений, осуществляться контроль над устойчивостью крупных гидротехнических сооружений, атомных станций и др.

Особый интерес представляют работы в области применения СНЧ-антенн для прогноза землетрясений, поскольку, по сей день, нет общепринятых критериев предсказания сейсмических событий, и все попытки решить эту задачу сводятся к выводам о необходимости комплексного подхода с привлечением нескольких методов. При этом обычно отдается предпочтение комплексу, основанному на использовании данных сейсмологии и геоэлектрики.

Установка "Зевс" расположена в зоне низкой сейсмической активности. Представляющие интерес с точки зрения мониторинга сейсмобезопасности ближайшие объекты - это Кольская АЭС, расположенная в зоне влияния Кандалакшского грабена, и АЭС "Лесной Бор" в Ленинградской области. Более удаленные объекты и районы, интересные для сеймопрогноза (рис. 1), расположены в зоне слабого воздействия источника "Зевс". Тем не менее, результаты экспериментальных наблюдений позволяют говорить о том, что обнаружение предвестников землетрясений с помощью "Зевса" возможно на большей части сейсмоопасных регионов бывшего СНГ и даже за его пределами.

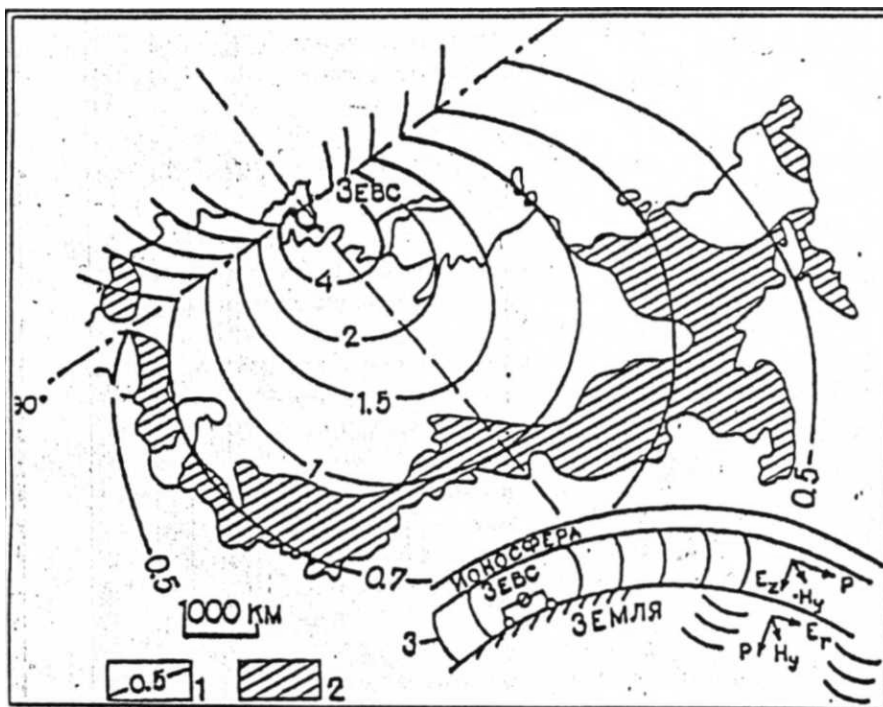


Рис.1. СНЧ-антенна «Зевс» и схема распространения излучаемого ею магнитного поля на территории СНГ.

Условные обозначения:

1 - изолинии магнитного поля в единицах  $10^{-1}$  нТ, приведенных к току 300 ампер; 2 - сейсмоопасные регионы территории СНГ; 3 - схема распространения СНЧ-сигналов в волноводе «Земля-ионосфера», штрихпунктирными линиями обозначены осевая ( $0^\circ$ ) и экваториальная ( $90^\circ$ ) линии источника «Зевс» на карте.

В 1995 г. по инициативе МЧС были выполнены контрольные измерения на Кисловодском сейсмопрогностическом полигоне, удаленном от антенны "Зевс" на 2.5 тыс. км. Несмотря на неблагоприятные зимние условия и высокий уровень помех, здесь были получены вполне удовлетворительные результаты измерений по повторяемости данных из цикла в цикл. Средняя погрешность наблюдений на частоте 125 Гц не превысила 6%. Учитывая, что средняя величина изменения сопротивления земной коры в период подготовки землетрясений с магнитудой 5-6 баллов составляет 16-20%, "можно считать, что полученный результат подтверждает перспективность использования источника "Зевс" для решения задач мониторинга. Есть положительный опыт регистрации сигналов источника "Зевс" в Китае для прогнозирования землетрясений [Сараев и др., 2000 г.]. По линии РАН разрабатывается проект использования источника "Зевс" с этой же целью в зоне Вранча в Румынии.

В заключение небезынтересно будет привести пример обнаружения нового геофизического явления с помощью СНЧ-радиостановки "Зевс". В ходе электромагнитного мониторинга, проводившегося в Карельском перешейке, а затем на Кольском полуострове, было установлено изменение электропроводности земной коры под действием гравитационного влияния лунно-солнечных приливных возмущений. Результаты электромагнитного мониторинга на Кольском полуострове, на удалении двухсот километров от источника, показаны на рис. 2 в виде графиков изменения значений кажущегося сопротивления и фазы импеданса во времени. Здесь же приведен теоретически рассчитанный график изменения альтитуды рельефа, земной поверхности в точке Авва-губа под действием приливных напряжений.

Результаты электромагнитного мониторинга позволяют сделать вывод, что при вздымании земной коры под действием лунно-солнечных приливообразующих сил происходит уменьшение удельного электрического сопротивления в верхнем слое коры мощностью порядка 7-8 км. И, наоборот: в фазе сжатия (опускания) увеличивается сопротивление в слое той же мощности. Можно предположить, что в наибольшей степени на суточные изменения электропроводности влияет промежуточный слой пониженного сопротивления на интервале глубин в 3-7 км.

На рис. 2 видно, что лунно-солнечные вариации оказывают существенное влияние на излучающие параметры СНЧ-антенны "Зевс", и, что этот фактор необходимо учитывать при проведении СНЧ-радиосвязи для обеспечения оптимальных условий передачи сигналов на погруженные объекты ВМФ. Приведенный пример доказывает взаимовыгодный характер работ по линии конверсии. Так новейшие достижения науки находят применение в оборонной промышленности.

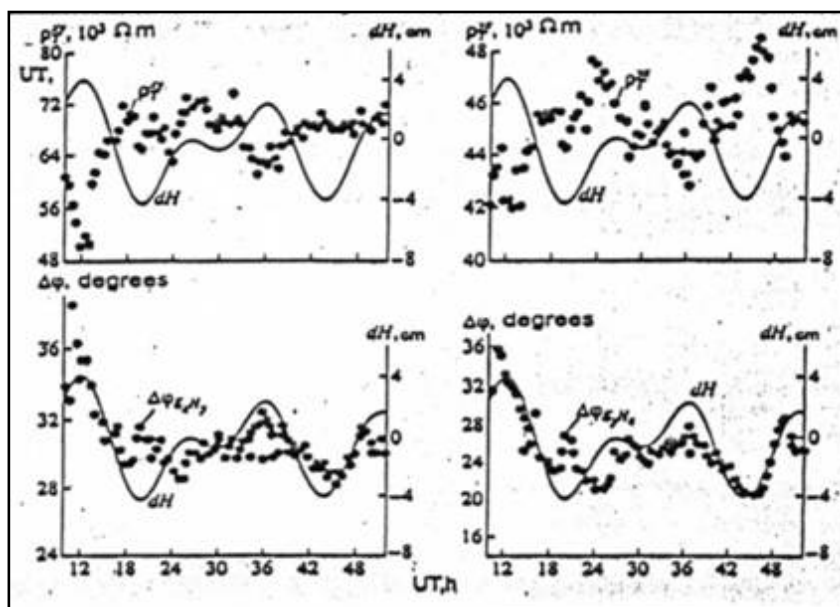


Рис.2. Результаты электромагнитного мониторинга.

В виде сплошной кривой дан график изменения альтитуды рельефа земной поверхности  $dH$  в сантиметрах. Точками отмечены значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса.

#### Список литературы

Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. (1994). Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ - диапазона. // ДАН. Т. 338, N 1. С. 106-109.

Saraev A., Pertel M., Kocherov A., Kharlamov M., Zhao G., Tang J., Wang J., Deng Q., Zhao J. Measurements of electromagnetic field generated by the Russian ELF transmitter in China at the distance of 7000 km // 15th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, August 19-26, 2000, Cabo Frio, Brazil, page 140.

**Фесенко Ю.В.(2011). «Создание новой радиолинии связи». // Из книги «Во имя будущего вспомним...» под ред. Ю.М. Кононова - Москва, ИРИАС, 2011. Глава 11, раздел 11.8 с. 615-622.**

Управление связи ВМФ

*Посвящается памяти Льва Борисовича Песина*

Управление связи ВМФ всегда традиционно уделяло внимание дальней перспективе развития новых видов связи и технических средств для обеспечения управления силами флота. Это направление реализовывалось через малобюджетный раздел программы вооружения "Фундаментальные и поисковые НИР". Со стороны Академии наук это направление координировал Научный совет РАН по комплексным проблемам "Радиофизические методы исследования морей и океанов", возглавляемый самим академиком Котельниковым В.А., а со стороны Военно-Морского Флота – начальник связи ВМФ через 3 отдел Управления связи ВМФ. Владимир Александрович всегда внимательно относился к нашим проблемам и активно участвовал в работе Совета.

Таких НИР было не так много, выполнялись они силами академических институтов с привлечением специалистов НИЦ связи ВМФ.

Схема выполнения была простая. В результате научного поиска 34-м НИИ связи ВМФ (а затем – НИЦ связи) совместно с Научным советом РАН определялась перспективная идея, возможность реализации которой обосновывалась теоретически. Результатом же были технические предложения по разработке новых линий и средств связи.



Мобильная генераторная группа ЭРС-67 на площадке ЛЭП при проведении экспериментов по генерации сигналов КНЧ, проводимых в НИР "Ливадия". Кольский полуостров. 2000 г.

Одной из немногих научно-исследовательских работ, вышедших из раздела "фундаментальных и поисковых" на уровень "прикладных", была НИР под шифром "Ливадия". А НИР "Ливадия-2" стала её прямым продолжением. Прикладные НИР являются одной из стадий жизненного цикла изделия или системы. Их задача - дать ответ на вопрос: возможно ли создание нового вида техники, и с какими характеристиками, а также определение возможности проведения ОКР по тематике НИР.

НИР "Ливадия-2" была открыта в 2001 году и касалась она разработки перспективных методов и научно-технических решений по построению радиолиний в интересах повышения эффективности управления объектами ВМФ. В ней, кроме прочих, исследовались два основных взаимосвязанных направления: методы повышения эффективности функционирования радиолиний сверх низкочастотного (СНЧ) диапазона и пути построения радиолиний крайне низкочастотного (КНЧ) диапазона.

Несмотря на формат НИР, объём исследований и экспериментальных работ в "Ливадии-2" был большим. В ней, в том числе, планировались:

- проведение теоретического анализа возможных механизмов и последствий воздействия излучения СНЧ-КНЧ диапазона на окружающую среду и человека, а также определение предельно допустимых уровней этого излучения для человеческого организма;
- разработка и обоснование требований к методам и средствам защиты от электромагнитного излучения СНЧ-КНЧ диапазона, в том числе к средствам коллективной и индивидуальной защиты;

- стендовые испытания приёмного антенного усилителя КНЧ диапазона;
- разработка схемных решений силового модуля макета КНЧ генератора и подготовка стенда с аппаратурой электропитания для испытания макета;
- разработка технических решений построения экспериментального измерительного приемника КНЧ-СНЧ диапазона с цифровой обработкой сигнала;
- разработка программного обеспечения для расчета полей КНЧ диапазона с учетом анизотропии ионосферы;
- исследование переходных и установившихся процессов в генераторе СНЧ-КНЧ диапазона на основе математического моделирования;
- исследование ожидаемых характеристик перспективных радиолиний СНЧ-КНЧ диапазона;
- изготовление макета силового модуля КНЧ генератора;
- стендовые испытания макета экспериментального КНЧ генератора;
- изготовление и тестирование макета экспериментального приемника КНЧ-СНЧ диапазона;
- разработка рекомендаций по снижению уровня помех радиоприему в диапазоне КНЧ;
- подготовка аппаратуры макета радиолинии для проведения экспериментальных исследований в КНЧ-СНЧ диапазоне;
- разработка программы и методики экспериментальных испытаний;
- проведение испытаний экспериментальной радиолинии КНЧ диапазона и обработка результатов.

Приведённый перечень исследований по понятным причинам далеко не полный, но и его достаточно, чтобы оценить значение этой НИР. 3 отдел в результате выполнения НИР "Ливадия-2" планировал получить действующий макет новой радиолинии, которой ещё не было ни у одного из государств (по открытым данным). Каково?!

Научным руководителем и "задающим генератором" НИР "Ливадия-2" был Лев Борисович Песин, капитан 1 ранга в запасе. Это один из немногих уникальных организаторов научно-производственных процессов, добивающийся высоких результатов. Иначе он просто не мог жить.

Лев Борисович родился в Рязани в 1933 году. Окончил Высшее военно-морское училище связи (1954) и Военно-морскую академию (1964). Кандидат технических наук. Служил в 34 НИИ связи ВМФ (с 1967): старший научный сотрудник, начальник лаборатории, начальник отдела. Провёл исследования в области космической связи. Участвовал в разработке и летно-конструкторских испытаниях навигационно-связной космической системы, в разработке техники связи с подводными лодками в неспецифических диапазонах частот. Принимал участие в проектировании и создании уникального центра дальней связи с подводными лодками и сверхмощных СДВ передающих комплексов. Лауреат Государственной премии СССР 1988 года. После окончания военной службы (1989) он продолжал работать в НИИ связи ВМФ. (Из: А.И.Мелуа «Энциклопедия "Инженеры Санкт-Петербурга").

Требования заказчика НИР – Управления связи ВМФ, Песин Л.Б. всегда выполнял безукоризненно и при этом у нас с ним было полное взаимопонимание в научно-технических вопросах и способах их решения. За Львом Борисовичем не надо было ничего проверять. Я бы даже сказал, что он сам себя часто проверял за нас и докладывал об этом.

К такой объёмной работе был привлечён целый ряд исполнителей, среди них НИЦ связи ВМФ, Центр ИНЭНКО РАН, НИИ по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ), НИИ радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета, Геологический институт и Институт физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН, Государственный Научно-исследовательский испытательный институт военной медицины МО РФ и Научный центр "Риф" при нём, "Проектно-конструкторское бюро "РИО", ООО «ТИРА-ЭЛ», ГУ "Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН", ЗАО "СКН", ЗАО "СУЛАК".

Уже в сентябре 2001 года по плану НИР на Северном флоте был испытан в реальных условиях первый действующий макет перспективного радиоканала и таким образом впервые подтверждена возможность приёма радиосигналов КНЧ диапазона под водой на удалении 200 км от источника излучения. Всего было проведено 105 сеансов связи с экспериментальным радиопередатчиком КНЧ и 9 сеансов от радиопередатчика СНЧ объекта "Зевс". За обеспечение этих испытаний приказом начальника Главного штаба ВМФ адмирала Кравченко В.А. были поощрены офицеры Управлений связи ВМФ и СФ, флотилии подводных лодок СФ, НИЦ связи ВМФ.

А к июлю 2004 года был разработан и изготовлен макет радиолинии КНЧ диапазона. Для проверки технических средств и характеристик макета в сентябре того же года на Северном флоте были тщательно подготовлены и проведены натурные испытания. Экспериментальная радиолиния состояла из:

- макета передающего генератора мощностью до 100 кВт в мобильном варианте (на усилитель мощности КНЧ диапазона, входящий в состав этого макета, в 2003 году получен патент РФ на полезную модель);
- передающей антенны, в качестве которой использовались линии электропередач системы «Колэнерго» длиной от 55 до 110 км;
- макета выносного унифицированного приёмного усилителя КНЧ;



- макетов приемного устройства.
- Подготовку и проведение испытаний обеспечивали:
- от НИЦ связи ВМФ – капитаны 1 ранга Пятненков А.Е., Воронин А.И., капитан 2 ранга Ильмер Д.В., Песин Л.Б., Акулов В.С., Панфилов А.С., Лисицын Ю.Д., Горбунов Б.К.;
- от Кольского Научного центра РАН – Жамалетдинов А.А.;
- от Северного флота – капитан 1 ранга Банных М.В., капитаны 2 ранга Жилинков В.И., Томилев В.А., Худолеев В.Е., капитан 3 ранга Бычков М.А., капитан-лейтенант Случинский Д.В.

Результаты испытаний однозначно подтвердили принципиальную возможность создания опытного образца новой радиолинии связи. Впервые в России был разработан и успешно испытан в береговых условиях макет аппаратного комплекса радиолинии связи КНЧ диапазона. Необходимость этой радиолинии для флота в то время не вызывала сомнений. Для определения уровня возможностей использования радиолинии КНЧ для реальной связи с объектами в море и уточнения тактико-технических требований к разрабатываемой технике связи требовалось провести экспериментальные испытания в морских условиях.

Проблема была в том, что по плану НИР "Ливадия-2" заканчивалась в 2004 году, а новые испытания требовали ещё более тщательной подготовки, на которую требовалось не менее полугода. Выход был найден. По предложению Управления связи ВМФ, которое поддержали Начальник кораблестроения, вооружения и эксплуатации вооружения – заместитель Главнокомандующего ВМФ по вооружению вице-адмирал Смоляков А.А. и председатель Морского научного комитета контр-адмирал Сидоренко Л.Г., Главнокомандующий Военно-Морским Флотом адмирал флота Куроедов В.И. в марте 2005 года утвердил продолжение работ по этой тематике в рамках другой НИР (шифр "Рябинник-2").

Итак, нашей "группе разнородных сил" (военных, науки и промышленности) предстояло решить ещё более сложную задачу: кроме того, что в эксперименте задействовался объект в море, на берегу мы намеревались испытать работу передающего генератора КНЧ на действующую антенну объекта "Зевс" (с отключением её от стационарного передающего модуля).

В соответствии с планом экспериментальных работ ВМФ испытания макета должны были проводиться осенью 2005 года. Цель испытаний: проверка в реальных условиях эксплуатации технических решений, использованных при построении нового поколения приемной и передающей аппаратуры КНЧ радиолинии, оценка качества приема сигналов и уровня помех на морском объекте и контрольных береговых приемных пунктах.

С мая 2005 года, когда в подготовке испытаний наступила активная фаза, мы начали испытывать всё нарастающие трудности. Причина была очевидной: к тому времени процесс выполнения управленческих решений на уровне ВМФ уже настолько сильно был "разбалансирован" с механизмом их реализации на местах, что приходилось прикладывать много дополнительных усилий для преодоления проблем, которых до этого просто и быть не могло.

Основным осложнением июня и июля было отсутствие авансирования исполнителей работ заказчиком (МО РФ) по причине финансовых ограничений общего плана, это на месяц задержало доработку аппаратуры макета, срок готовности которого был установлен 1 сентября 2005 г.

Реальные условия на флоте также оказались далеки от идеальных, изложенных в программе и методике испытаний макета радиолинии. Уже при согласовании программы испытаний по морскому подвижному объекту Управление связи СФ выдвинуло обязательные требования: взаимоувязка испытаний с выполнением объектом задач "основного мероприятия" (вместо специального выхода) по экономическим соображениям; испытания не должны были снизить эффективность, скрытность и оперативно-технические возможности по действующей связи; впоследствии флотом было введено ограничение и по глубине радиоприёма (в меньшую сторону). Но эти ограничения резко снижали информативность и эффективность испытаний в целом. Тем не менее, главный инженер УС ВМФ согласился с условиями флота, и программа испытаний была откорректирована. Для исполнителей вопрос стоял ещё проще: или так, или никак.

Уже перед самым началом испытаний, в первой декаде сентября, возникла проблема со стороны ОАО "Колэнерго" в предоставлении ЛЭП в качестве передающей антенны из-за аварийной ситуации и незаконченных ремонтных работ на основной и одной из резервных линий. Поэтому пришлось "на ходу" корректировать частотно-временное расписание трассовых испытаний и перебазировать макет передающего генератора, установленный на шасси ЗИЛ-131, к точкам подключения.

Зато объект "Зевс", которым к тому времени командовал капитан 1 ранга Мольков Андрей Владимирович, нас выручил: генератор КНЧ включался в работу уже на модернизированную (в ОКР, ведущейся по заказу УС ВМФ) в 2005 году антенную систему объекта, что давало значительное увеличение уровня электромагнитного поля сигнала в точке приёма.

Кроме всего прочего, буквально до последнего дня не была известна дата выхода в море морского подвижного объекта. У нашей команды нервы были на пределе, потому что мы понимали, что другой возможности провести эти испытания в 2005 году не будет. Был риск срыва испытаний.

Но вопреки всему экспериментальные испытания новой радиолинии состоялись. Приём и регистрация сигналов КНЧ производились не только в море, но и на береговых пунктах приёма Кольского полуострова, а также полуострова Камчатка, до которого расстояние от излучателя составляло, между прочим, около 8 100 км.

Несмотря на упомянутые мной ограничения программы испытаний, нам удалось общими усилиями, пусть и на минимально допустимом уровне, провести эксперимент и получить достаточно статистических данных для дальнейшей работы. А главным результатом эксперимента было подтверждение возможности надёжного приёма радиосигналов КНЧ диапазона в реальных режимах эксплуатации морских объектов.

Интересны физические характеристики диапазона КНЧ. Это электромагнитные волны частотой от 3 до 30 Гц, по-другому – декамегаметровые волны от 100 000 км до 10 000 км. Но наша аппаратура 29.09.2005 г. обеспечила передачу и приём сигнала в радиоканале на частоте – **ВНИМАНИЕ!** – 0,1 Гц (длина волны 3 000 000 км). Это ниже нижнего предела (3 Гц) по классификации радиоволн. Вот этим достижением Управление связи ВМФ и все, причастные к эксперименту, могут гордиться в полной мере.

В обеспечение испытаний очень большой вклад внёс Песин Л.Б., он отдал этому делу много сил и здоровья, в полной мере проявил свой организаторский талант.

Работа закончилась проектом тактико-технического задания на ОКР по этой теме.

А эксперименты с аналогичным мобильным генератором, усовершенствованным группой под руководством Жамалетдинова А.А., были продолжены уже в интересах геологии. В 2010 году закончены международные испытания мобильного генератора "Энергия-1", предназначенного для глубинных геоэлектрических исследований земной коры, в том числе для поиска полезных ископаемых. Уникальность предложенного российскими учёными метода глубинной электроразведки состоит в использовании в качестве излучающих антенн двух промышленных ЛЭП протяжённостью 109 и 120 км. При этом литосфера исследуется на глубины 50-70 км. (Журнал "Наука и жизнь" № 6, 2010).

---

---

### ***Мольков А.В.(2012) 25 лет работы объекта «Зевс». // Североморск-3, юбилейный проспект.***

В 60-е годы Военно-морской Флот подошёл к очередному этапу своего развития. Создание атомного подводного флота и появление в его составе ракетных подводных крейсеров стратегического назначения поставили перед военной наукой задачу - обеспечить надёжную устойчивую связь с ними на боевой службе. Было ясно, что для этого потребуются радиостанции большой мощности, работающие в диапазоне сверхдлинных волн, которые способны проникать сквозь толщу воды и приниматься подводными лодками, находящимися на большой глубине.

После проведения научно-исследовательских работ, в ноябре 1972 года Правительством страны было принято решение о создании на Кольском полуострове сверхнизкочастотной радиостанции, что и послужило началом образования объекта Военно-Морского флота, получившего название «Зевс».

В 1977 году началось строительство объектов первой очереди, и уже к весне 1983 года были успешно проведены государственные испытания радиопередающего модуля № 1.

В 1985 году завершилось строительство и государственные испытания объекта «Зевс».

Первым командиром центра дальней связи на сверхнизких частотах научно-исследовательского полигона связи ВМФ был назначен капитан 1 ранга Любан В.Г.

С 1986 года центр решает задачи боевого дежурства.

С самого начала своего существования «Зевсу» было предписано стать станцией двойного назначения. Возможности, которыми он обладает, позволяют использовать его не только в военных целях. С начала 90-х годов объект работает в интересах прикладной и фундаментальной науки. Академией наук для него разработана специальная федеральная программа. Станция позволяет детально анализировать состояние и структуру земной коры, решать фундаментальные проблемы электромагнитного зондирования Земли и изучать строение рудных пород. Наиболее эффективными эти работы могут быть для Мурманской области, где мощность сигналов «Зевса» в земле особенно велика. Результаты работ показывают его широкие возможности для изучения нефтеперспективных участков шельфа Баренцева моря, прогнозирования землетрясений практически в любой точке земного шара.

С принятием на вооружение и вводом в состав объекта новых комплексов технических средств расширяются его возможности и задачи. Ныне объект Военно-Морского флота «Зевс» представляет собой мощнейший комплекс радиопередающих устройств, которые охватывают весь диапазон частот известных современной науке от ультракоротких до сверхдлинных волн. Техническое оснащение «Зевса» позволяет сегодня не только передавать сигналы боевого управления на глубокопогруженные подводные лодки, но и осуществлять руководство всеми силами Российского флота.

---

---

**Понятова А. (2013). Что обнаружила «СУРА» // Из статьи «Зачем греют небо. Мифы и правда.» // Наука и жизнь. № 8, 2013, С. 7-9.**

В 1974 году в экспериментах с первым нагревным стендом НИРФИ в Зименках под руководством Г.Г. Гетманцева обнаружили, что под воздействием мощного модулированного КВ-излучения ионосфера, словно гигантская антенна, начинает излучать радиоволны с частотой модуляции - происходит своего рода детектирование сигнала. При работе стенда СУРА (Рис. 1) регистрировались даже частоты ниже 10 Гц. Это явление назвали у нас «эффектом Гетманцева» (название на Западе не принято). Оно объясняется тем, что мощный КВ-сигнал модулирует электрический ток в Е-области, который становится источником вторичных радиоволн. Г.Г. Гетманцев считал, что в полярной области, где токи сильнее, эффект будет значительнее. Это подтвердили работы на стенде в Мончегорске (Рис. 1).

Низкочастотное излучение ионосферы можно использовать для связи с подводными и подземными объектами. Дело в том, что даже применяемые для связи с подводными лодками сверхдлинные волны  $\lambda = 10 - 100$  км ( $f = 30 - 3$  кГц) проникают вглубь всего до 20 метров, а вот ещё более длинные волны легко проходят сквозь гораздо большую толщу земли и воды. Но создание передатчика для столь низких частот - чрезвычайно сложная задача, поскольку требуются огромные антенны и мощности.

Во всём мире только у России и у США есть такие устройства («Зевс» и Сангвин на рис. 1). Наша система «ЗЕВС» на Кольском полуострове имеет  $\lambda = 1500 - 15\ 000$  км (200 - 20 Гц), сравнимую с размером Земли. При работе в основном диапазоне - 82 Гц - её сигнал проникает в воду на глубину 60-70 метров. Обычная дипольная антенна системы была бы длиной в тысячи километров ( $\lambda/2$ ), что технически нереализуемо, и поэтому размер антенны «ЗЕВСа» всего 60 км, что сделало её крайне неэффективной. Так что использование ионосферы в качестве антенны с характеристиками, недостижимыми для наземного источника, - очень выгодное решение. Именно для «ионосферной» связи с подводными лодками и была построена система НААРР (на Аляске, Рис. 1); её сигнал принимается глубоко под водой на расстояниях в тысячи километров.

Ещё одно возможное применение эффекта - радиолокационное исследование земных недр (геолокация, подземная томография). Подобные работы уже идут с использованием систем «ЗЕВС» и НААРР.

Отечественным учёным из НИРФИ принадлежит безусловный приоритет в обнаружении искусственных периодических неоднородностей (ИПН), формируемых мощной радиоволной в ионосферной плазме (1975 г.). Это позволило разработать ещё один метод диагностики атмосферы. Стенд СУРА излучает вверх мощную радиоволну на частоте ниже критической частоты ионосферы. Отражённая от ионосферы волна интерферирует с ней, образуя стоячую волну. Электрическое поле в ее пучностях нагревает электронный газ, создавая периодическую структуру повышенной температуры с периодом  $\Lambda = \lambda/2$  падающей радиоволны. Нагретые области, в свою очередь, формируют неоднородности электронной концентрации, на которых импульсы локатора рассеиваются и возвращаются к приёмнику. Интенсивный сигнал появляется, только когда волны, рассеянные отдельными неоднородностями, складываются в фазе, что и обусловило название - «метод резонансного рассеяния радиоволн на ИПН». Изучение рассеянного сигнала позволяет исследовать атмосферу на различных высотах.

**От редактора.** Курсивом выделены редакторские дополнения и правки. На рис. 1 дополнительно показано положение СНЧ радиопередающих устройств, упомянутых в тексте статьи.



Рис. 1. Схема расположения установок нагрева ионосферы (1) и сверхнизкочастотных (СНЧ) радиопередающих устройств (2).

**Тронд Якобсен.**(2013). «Зевс», российский СНЧ-передатчик на частоте 82 Гц (система излучения крайне низкой частоты, использующая сверх длинные волны) // ALFLAB, Халден в Норвегии, URL: [http // www.vlf.it/ zevs/zevs.htm](http://www.vlf.it/zevs/zevs.htm). ( Перевод с английского)

**Trond Jacobsen. Zevs (2013). The Russian 82 Hz ELF transmitter (A Extreme Low Frequency transmission-system, using the real longwaves).** // ALFLAB, Halden in Norway, URL:<http://www.vlf.it/zevs/zevs.htm>

#### **Почему используются такие экстремально низкие частоты для связи с подводными лодками?**

Основной причиной этого является способность сигналов сверхнизкой частоты (СНЧ) проникать глубоко вниз под поверхность океана. СНЧ частоты проникают не только сквозь воду, но также сквозь толщину морского льда, что делает возможным подводным лодкам получать приказы, в то время, когда они перемещаются под полярными ледяными шапками.

Там внизу, в океанах на глубине часто более 300 метров есть флоты вооруженных атомных подводных лодок (АПЛ), как с Востока так и с Запада, которые прячутся (скрываются) и ищут друг друга, используя сложное оборудование для наблюдения за соответствующими «враждебными» странами. Мощная АПЛ может находиться на этих глубинах в течение недель без необходимости подниматься на поверхность для забора свежего воздуха или других припасов.

Основная проблема заключается в том, чтобы передать информацию, которую собирают на поверхности, вниз на субмарину. В водах, где подводные лодки патрулируют вблизи постоянных баз, внизу установлены несколько станций для гидроакустической связи. Эта система связывает подводную лодку с береговыми пунктами, передающими радиосигналы. Подводная звуковая связь - достаточно эффективна для совместных тактических действий подводных лодок с другими субмаринами и/или надводными кораблями.

Поскольку эти искусственные акустические системы подводной связи предназначены для сравнительно коротких расстояний (до 10-30 км), то проблемы возникают, когда подводная лодка действует за пределами базовых районов, далеко от охраняемых вод, защищенных национальной обороной и системами связи.

В нейтральных международных водах единственным средством связи с подводными лодками является использование радиосигналов в диапазоне ОНЧ или СНЧ. Способность радиосигналов проникать в воду, зависит от частоты и солености воды. В середине Атлантического океана с минерализацией 3,2%, ОНЧ сигнал (частоты от единиц до первых десятков килоггерц) будет проникать до глубины 10-20 метров. Это всего лишь глубина перископа для современной крупномасштабной подводной лодки.

В районах с меньшей соленостью, подобно Средиземному морю или в солоноватых водах Балтийского моря, тот же сигнал будет возможным получать на глубине свыше 40 метров. Для подводных лодок, действующих глубже чем эта, есть единственное решение для одностороннего сеанса связи с поверхностью - использование радиоволн в СНЧ (крайне низкой частоты) в диапазоне, ниже 3 кГц. По состоянию на сегодня ВМФ России и ВМС США обслуживают СНЧ приемники, способные поддерживать связь с их соответствующими подводными лодками при их оперативной скорости и глубине.



#### **Расположение «Зевса»**

Российский СНЧ передатчик «Зевс», расположен к северо-западу от Мурманска - 69 ° с.ш. 33 ° з.д., на Кольском полуострове, на северо-западе России.

В Мурманской области на Кольском полуострове располагается порт приписки Российского Северного флота и множество других военных объектов, подобно Российскому Арктическому флоту ВВС, действующему на аэродроме Оленегорск. Надо полагать, что «радио ретранслятор» самолетов Ту-142 MR (медведь J), размещенный на этом аэродроме, вместе с установкой «Зевс» и RDL 18,1 / 21,10 кГц сверхдлинноволновыми (СДВ) радиопередатчиками являются основой СНЧ/СДВ канала связи между ОП центром Кремля и вооруженными российскими АПЛ.

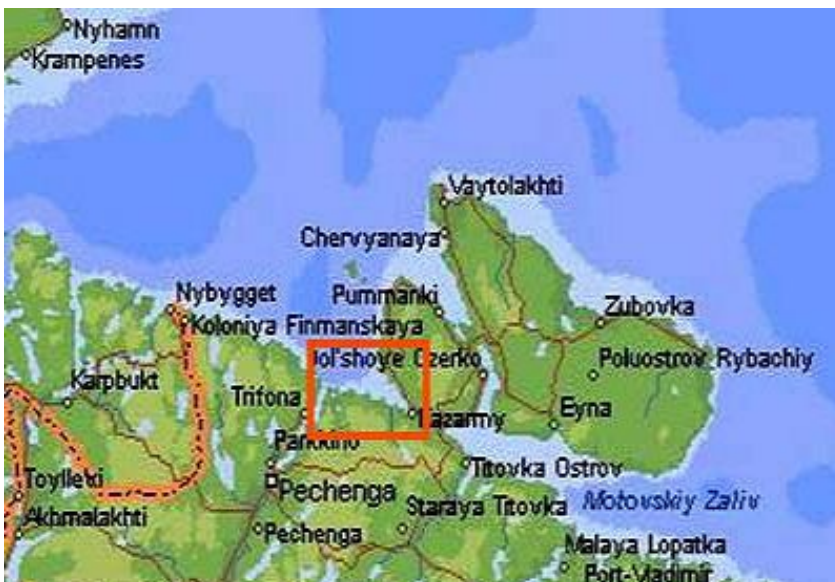
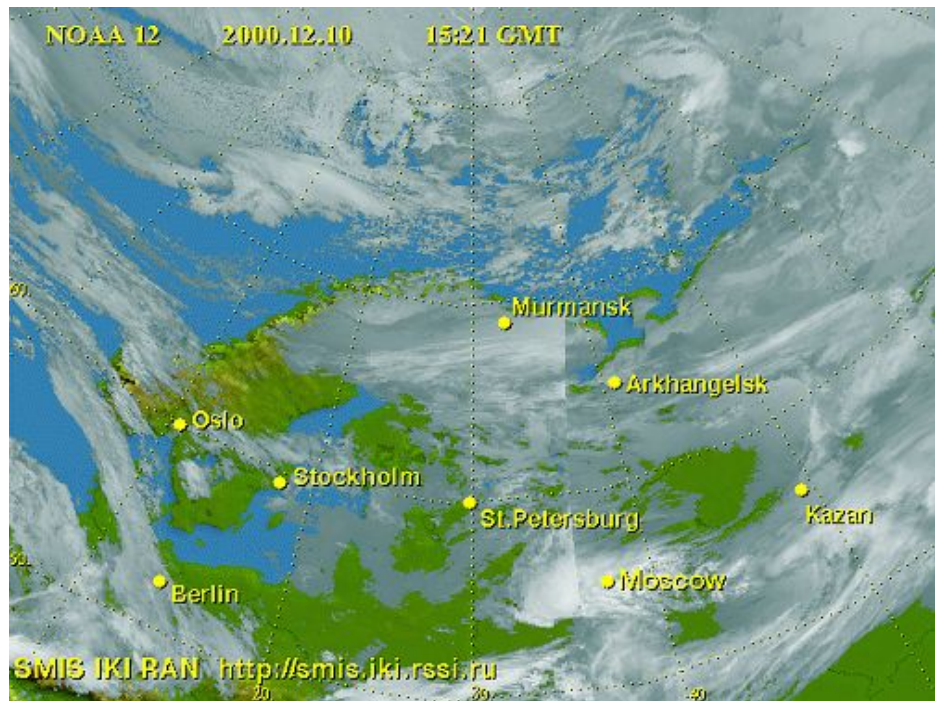
Строительство и обслуживание СНЧ-передатчика,- не легкая и не дешевая экономически и технически задача. Антенная система требует много места, а передатчик требует собственной небольшой электростанции. Кроме того, и геологические условия на месте сооружения антенны должны быть изучены до начала строительства.



Правило номер один, для размещения успешного СНЧ передатчика, подобного «Зевсу» на частоте 82 Гц, и его аналогу в США, действующему на частоте 76 Гц от двойной антенны WMT (Wisconsin Transmitter Facility) и MTF Michigan Transmitter Facility), места заложения должны обладать очень низкой удельной электропроводностью. Это - необходимая характеристика, исключительно, чтобы заземлять базирующиеся ELF-передатчики, в отличие от всех других видов

радиопередатчиков, где нужна хорошая связь наземного заземления для антенны. Подходящим местом для СНЧ передатчика являются районы, где слой осадков, включающих песок или мореный гравий, не превышает нескольких метров. Тонкий слой осадков должен залегать на кристаллическом основании, сложенном изверженными гранитами или метаморфическими гнейсами.

В Канаде и Северной части США есть Канадский, так называемый, Лаврентийский щит, общей площадью 4790000 км<sup>2</sup>. Южная часть щита обнажена в Северном Мичигане и Висконсине. Другое подходящее место в США это Адирондак в штате Нью-Йорк. В Европе аналогичные подходящие места для СНЧ передатчиков, можно найти в областях, охватываемых Балтийским и Каледонским щитами. Подобно Скандинавским странам, обнаженные участки европейского континентального основания найдены также и в западной части России, как например, на Кольском полуострове. Другие подходящие места для сооружения передающей антенны СНЧ находятся в странах с геологическими остатками давно эродированных горных хребтов, как например в Шотландии.



Глен Гарри Форрест в Шотландии был предложен в качестве места размещения СНЧ передатчика Королевского флота, действующего на частоте 72 Гц, для связи с атомными подводными лодками Трайдент. Этот проект был

испытан, но неэффективность расходов была высока, и после политической дискуссии, станция СНЧ связи Глен Гарри, канула в историю.

### Частота экстремально низкой передачи

С передаваемым сигналом таким низким как 82 Гц или 0.000082 МГц (соответствующая длина волны равна 3658536.5 метрам или 3658.5 км) мы имеем дело с действительно длинными волнами. На военной рабочей частоте «Зевса» длина волны - более чем  $\frac{1}{4}$  диаметра Земли. Если вы полагаете, что ваш задний двор слишком мал для половины длины волны диполь-антенны 80-метрового радиоловительского диапазона, то попробуйте представить себе половину длины волны диполь-антенны на такой низкой частоте как 82 Гц. На этой крайне низкой частоте половина длины волны диполь-антенны уже будет 1829.25 км; это больше, чем расстояние Москва-Берлин или Лондон-Неаполь в Европе. И на частоте 82 Гц диполь должен быть больше, чем расстояние между Майами - Сент-Луис и Нью-Йорк - Нью-Орлеан в Северной Америке. Даже расстояние между Ренато - QTH в Кумьяне - Италия и мной здесь, в Халден - Норвегия, приблизительно 1660 км, короче, чем полдлины волны 82 Гц диполя.

Но к счастью для разработчиков СНЧ станции Зевс, им нет необходимости в создании гигантских антенн, подобных этим очень большим теоретическим дипольным антеннам, чтобы от передающей станции, расположенной высоко за полярным кругом, в районе Мурманска, передать сигнал на российские подлодки, плавающие глубоко под волнами океанов. Решение проблемы создания этой гигантской СНЧ антенны, на самом деле находится прямо под вашими ногами.

### Ресурсы передатчика Кольского полуострова

Российский СНЧ передатчик Зевс в начале 1990-х был обнаружен во всем мире несколькими системами измерения радишума, обслуживаемыми Стэнфордским университетом. Сигнал на частоте 82 Гц был зарегистрирован даже на базе Aggrival Height в Антарктике ( $78^\circ S 167^\circ W$ ) (это около 20 тысяч километров /ред.). В то время не было никакой доступной информации о других передатчиках СНЧ, кроме системы передатчика США на частоте 76 Гц. И различие между ними не могло быть большим, так как существует обширная литература, охватывающая разработку и развертывание в США двойной антенны передающей системы WTF / MTF.

Ученые Стэнфордского университета быстро предположили, что источник сигнала 82 Гц находится в России. Этот логический вывод основывался на сравнительно большой силе сигнала 82 Гц передачи в Søndrestrømfjord – Гренландия, научной станции и ссылки на российский СНЧ передатчик в статье (!!!) Тома Клэнси, который имел репутацию знатока в вопросах обороны. Они также предсказали конструкцию и ориентацию антенны передатчика как длинный горизонтальный электрический диполь, ориентированный в направлении приблизительно Восток - Запад (EW).

Позднее это было подтверждено российскими источниками. Передатчик состоит из двух генераторов переменной частоты синусоидального напряжения и двух параллельных горизонтальных заземленных антенн, каждая длиной около 60 км. Генераторы обеспечивают токи 200-300 А в антеннах в диапазоне частот от 20 Гц до 250 Гц. Но есть одна поправка, которую нужно сделать; две параллельные антенны длиной 60 км являются вовсе не антеннами, а питающими линиями. Фактически антенной является сама земля. Сооружая антенну в месте с плохой эффективной электропроводностью земли, и заземляя концы питающей линии/антенны, вынуждают сигнал идти глубоко в землю, делая саму землю эффективным излучающим элементом.

Фактический внешний вид видимой части питающей линии, это гигантская антенна, выглядящая так же, как старые телеграфные провода, повешенные на телеграфные столбы. Вниз от последнего полюса в конце каждой ветви антенны, есть толстый медный провод до грунта и установленный глубоко в скважине, для заземления. (См. статью открытой лаборатории «Обзор подводных систем связи», IK1QFK и OH2LX об основной схеме системы СНЧ антенн).

Расчеты, выполненные по данным, собранным еще в 1990 году, также показывают нам, что СНЧ передатчик Зевс 82 Гц имеет на 10 dB (в три раза) большую мощность излучения, чем СНЧ передатчик ВМС США на частоте 76 Гц с двойными станциями WMT/MTF. Мы не будем затруднять читателя сложными математическими объяснениями, но приведем некоторые факты. Магнитный момент  $M$  ( $A \cdot m^2$ ) горизонтального магнитного диполя (HMD) выражается следующим образом:

$$M = ILW$$

$L$  - это длина антенны (м),  $I$  - это ток в антенне (А),  $W$  - эффективная вертикальная протяженность или глубина, антенны (м).  $W$  найдена с помощью формулы, основанной на постоянстве распространения и соответствующей глубине отдельных токопроводящих слоев заземлений под СНЧ - антенной. Для простоты мы заявляем, что  $W = h_1$ , где  $h_1$  — глубина первого проводящего слоя.

Если мы сравним с 76 Гц СНЧ передатчиком:

Средняя эффективная проводимость земли  $\sigma$  под WTF/MTF антеннами составляет приблизительно  $2.4 \times 10^{-4} C/m$ , который дает эффективную глубину  $W \sim 2.6$  км на частоте  $f=76$  Гц (глубина  $W$  определяется как

эффективная глубина проникновения плоской электромагнитной волны на частоте  $f$  над полупространством с удельной электропроводностью  $\sigma$  по формуле  $W = \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{10}{\sigma \cdot f}}$ , км / ред.).

Для самой плохо проводящей области Кольского полуострова существует верхний слой, с уд. электропроводностью приблизительно  $10^{-5}$  С/м до глубины ( $h_1$ ) около 10 км, под которым находится второй слой, с уд. электропроводностью приблизительно  $10^{-3}$  С/м.

Для комбинированных WTF /MTF антенн, работающих на 76 Гц, у нас есть:

$$M \sim 2 \times 300(\text{А}) \times 22.5(\text{км}) \times 2.6(\text{км}) = 3.51 \times 10^4 (\text{км}^2)$$

Поскольку магнитный момент для передатчика Зевс в 1990 году принимаем предположительно на 10 дБ, больше, чем это для комбинации WTF / MTF, то он должен быть равен  $1,1 \times 10^5 (\text{км}^2)$

Для антенны длиной 55 км, требуемый ток  $I$  -200 А. На частоте 82 Гц магнитный момент «Зевса» составит:

$$M \sim 200(\text{А}) \times 55(\text{км}) \times 10(\text{км}) = 1,1 \times 10^5 (\text{км}^2)$$

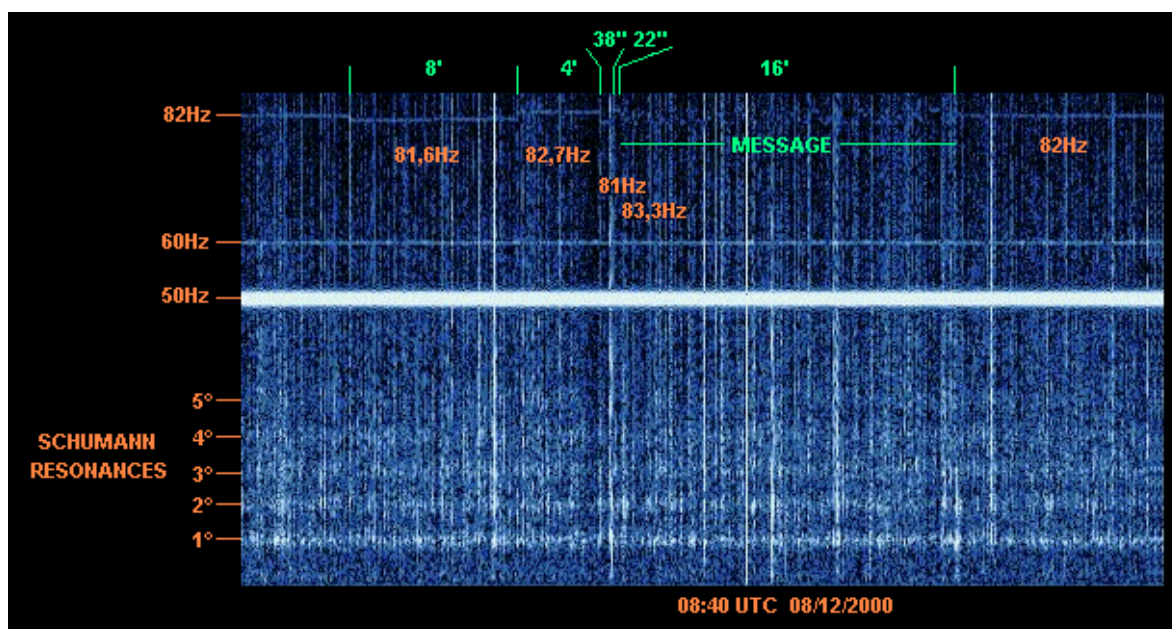
Из-за очень низкой эффективности, эффективная излучаемая мощность составляет только пару ватт (!), но этого достаточно, чтобы обеспечить почти глобальное покрытие на этих частотах, поскольку сама земля является фактически антенной.

### Способ передачи информации.

82 Гц передатчик Зевс технически говоря, совершает передачу информации, используя способ минимального сдвига несущей частоты МСК (*MSK - minimum-shift keying* / ред). Этот способ передачи информации используется почти на всех современных подводных лодках - VLF группы, на несущих частотах 3 - 30 кГц, Режим передачи сигналов источника Зевс и аналогичных СНЧ передатчиков является уникальным, поскольку во время фазы передачи сообщений используется очень узкий частотный сдвиг несущей частоты передатчика.

Самая широкая наблюдаемая полоса смещения частоты, находится в узком диапазоне от 81 до 83,3 Гц, в начале передаваемого сообщения! Сдвиг несущей только 2,3 Гц создает различие на отметке и в пространстве МСК сигнала.

Это, очевидно, требует некоторого довольно сложного, программного обеспечения декодирования, используемого компьютерной системой бортовой связи подводной лодки. Частота СНЧ посылки смещается из нормальной несущей частоты 82 Гц, до 81,6 Гц и до 82,7 Гц, до этого сообщения. Это - наиболее вероятно, функция вызова «Ожидайте сообщение» российского передатчика Зевс.



Передача Зевс, записанная в Италии Ренато Ромеро 8 декабря 2000 года в 08:40 UTC. Сигнал «ожидайте сообщение», 81.6 Гц низкого уровня в течение 8 минут, 82,7 Гц высокого уровня в течение 4 минут легко обнаруживается в спектрограмме. После 16 минут передачи последовательности длинных сообщений снова несущая - 82 Гц. Из-за длительной экспозиции появляются полосы резонанса Шумана, легко видимые в нижней части спектрограммы.

### Кодирование и декодирование сигнала Зевс.

Даже после сокращения числа российских и американских ядерных вооружений все еще достаточно атомных боеголовок на борту подводных лодок в мире, чтобы раз и навсегда стереть нас с этой планеты. Когда Вы управляете всемирной судьбой, Вы не хотите, чтобы случайно начался ядерный удар, ведущий к третьей и последней мировой войне на родной планете. На корабле существует компьютер связи, следящий за сообщениями с приоритетом. Ключ заключается в создании кода, чтобы не было сделано много вреда, если сообщение понято неправильно. Очень мало известно о фактическом коде, используемом в России СНЧ передатчиком на Кольском полуострове.

Если бы я узнал фактический код, я, в любом случае, не дал бы информации, так что беспокойные любители дешифрования должны охладиться. Что гораздо более интересно, чем фактический код, так это - как эти очень медленные системы передачи доставляют сообщение получателю.

Почти всемирный охват передатчиком Зевс, делает возможным посылку односторонних сообщений на русские подлодки (субмарины) под водой, как в Атлантическом, так и в Тихом океанах. С помощью СНЧ передатчика, подобного русскому «Зевсу», оснащенные ядерным оружием подлодки могут оставаться под водой на действующей глубине с действующей скоростью перемещения в течение недель и месяцев, оставаясь невидимыми для "неприятеля".

Самым простым (грубым) способом связи с субмариной, находящейся на глубине, является использование СНЧ передатчика в качестве «звоняря». Это похоже на классические гангстерские фильмы «не звоните нам, мы вам позвоним». Капитанам для решения задач, полученных в порте приписки, приказывали занять подводной лодкой определенную позицию и оставаться там, в течение определенного времени, пока СНЧ сигнал с правильной частотой не обнаружен компьютером на борту подлодки. Если такой сигнал обнаружен, то принимается несколько действий. Возможный сценарий заключается в перемещении к югу от безопасных глубоких вод к более мелкой воде, для того чтобы получить новые приказы на стандартных частотах связи в диапазоне VLF и выше.

Это может быть сделано посредством запуска буя ELF/VLF связи, который делает возможным получать радиосообщения, данные целевого назначения и спутниковые сигналы навигации, оставаясь на разумно безопасной

глубине. Российские подводные лодки, типа 667 «Дельта» имеют два из этих плавающих буюв связи. Или с повышенным риском обнаружения, капитан может поднять подводную лодку до перископной глубины и использовать спутниковую или другую связь высокого темпа передачи данных. Для того чтобы использовать полный потенциал «Зевса» как инструмента одностороннего, но всемирного, средства связи, требуются некоторые чуть более сложные кодирования сообщений.

СНЧ передатчики обладают очень низкой скоростью передачи данных. В сочетании с высоким уровнем естественных шумов на используемых сверх низких частотах это предъявляет особые требования к способам кодирования передаваемых сообщений.

Сообщения с использованием прямых приказов, таких как: «огонь баллистических ракет 2,4,6,8 по предварительно запрограммированным адресам» или «баллистические ракеты 1,3,5,7 должны быть направлены на 59° 8'12" N 11° 23' 55" E» (мой QTN!) мало вероятно, так как это, несомненно, может вызвать необратимый эффект (!), если это было неправильно расшифровано компьютером связи на борту подводной лодки.

С форматом передачи, используя только единственный код из трех букв, и повторяя этот единый код в течение 15 минут сегмента сообщения СНЧ передачи, будет еще возможным сигнализировать около 35937 различными кодами ( $33 \times 33 \times 33 = 35937$ ), если используются 33 буквы русского алфавита.

Посланное закодированное сообщение, является регулярной ошибкой корректирующей код. Скорость составляет несколько битов в минуту, повторяется до тех пор, пока не накапливается достаточно данных, чтобы позволить приемнику решить, успешно ли получено письмо. В конце сегмента сообщения ожидается завершить тремя правильными символами в кодовое слово «путешествие» от передатчика Зевс подводной лодке.



Внутри российской субмарины, типа 227. Подлодка находится на перископной глубине



В начале 1990-х годов передатчик Зевс наблюдался несколько раз в использовании телеграфа и азбуки Морзе. Если русские все еще используют этот режим и код, те же правила применяются для этого вида связи. Продолжительность каждого тире и точки конечно очень длинная, по сравнению с нормальной скоростью азбуки Морзе - как слышат на радио любительских диапазонах. Вместо манипуляции несущей включения и выключения, было бы полезно для качества передачи вместо этого использовать частотный сдвиг в передаваемой посылке. В качестве примера, как это работает MKL LF-передатчик, работающий на 82.75 кГц от Кинлос в Шотландии, MKL использует этот режим и код для передачи TAFS (сообщения о прогнозе погоды) передающей на час, каждый час.

Некоторые источники указывают на другие виды рабочих режимов для СНЧ передатчиков, подобных «Зевсу». Некоторые из них явно отслеживаются во время передачи теста. Но самый простой режим из них всех и наиболее опасный один, - это режим «непрерывной передачи». Специальный код, «ситуация нормальная» постоянно отправляется, но затем предусмотрены и запланированы перерывы в этой цепи ОК- сигналов, указывающие на то, что «экстремальная ситуация» была создана. Этот перерыв, и потеря всех данных с поверхности, - приказ для начала новой последовательности действий, основанных на этой новой ситуации, на земле. Очевидный режим связи для страны, уже в полном оповещении ядерного нападения. Пусть это никогда не случится.

### **Невоенное использование передатчика Зевс**

В отличие от двойной WTF/MTF США СНЧ передатчик Зевс СНГ на Кольском полуострове используется не только для целей военной связи. Электромагнитные волны СНЧ проникают не только в воду, но и в землю на большие глубины. Эти свойства используются для геофизических исследований.

В 1994 году было выполнено электромагнитное зондирование и мониторинг Земной коры Институтом земной коры Санкт-Петербурга и Геологическим институтом Кольского научного центра. Были использованы частоты в диапазоне 31-166 Гц. Сигнал высокого разрешения мог измеряться на удаленностях до нескольких тысяч километров от источника. С 1995 года и далее Зевс передатчик был использован в различных исследовательских проектах, связанных с мониторингом сейсмической активности. Предвестники, такие как изменение проводимости пород и помехи в ионосфере - важные сигналы раннего предупреждения подготовки землетрясения.

Использование 82 Гц передатчика Зевс обеспечивает высокую точность измерений, что позволяет извлекать данные сверхглубокого зондирования, ранее невозможные с помощью стандартных источников импульсного электромагнитного поля. На Северном Кавказе в 2700 км от Кольского полуострова, поле 82 Гц, достаточно сильно, чтобы уверенно измерять с использованием стандартных широкополосных станций АКФ-2 аудиоманнитотеллурические (АМТ) зондирования.

Ближе к Коле, на расстоянии «всего лишь» 950 км, на Карельском перешейке - СНЧ сигнал 82 Гц используется для сбора данных корреляции вертикальной приливной деформации земной поверхности. Эта деформация вызывает изменения в земной проводимости, таким же образом, как и перед землетрясениями.

Нормальная деформация земной коры составляет до 20 см на полигоне Карелия (на экваторе приливные деформации земной поверхности достигают 60 см). Эта информация необходима для эффективного анализа сигналов раннего предупреждения возможного землетрясения.

Этот перспективный метод предсказания землетрясений используется в экспериментальных исследованиях в Китае в сотрудничестве между Институтом геологии, Китайского сейсмологического бюро в Пекине и Санкт-Петербургского государственного университета в России, на нескольких полигонах в Северном Китае вблизи Пекина, Baodi и Jixian

### **СНЧ - часто используемое и неправильно воспринимаемое понятие.**

Поищите СНЧ на веб-сайтах и вы получите немало ссылок, направляющих вас от небольших фей и эльфов, через французскую нефтяную компанию, в самые невероятные истории о лучах смерти, управления разумом и электронной войне.

Электромагнитное излучение с частотами в диапазоне СНЧ, может, конечно, как все электромагнитные излучения, серьезно повредить вашему здоровью. Если поле является достаточно сильным, если вы подвергаетесь воздействию электромагнитного поля слишком долго. Если... я не говорю, что СНЧ приближает день Страшного суда, и что активисты не правы.

Человеческое тело полно электрических сигналов нескольких различных частот. Все искусственные поля от телевидения, от сотовых телефонов, военной связи, розеток и электрических полей и т.д. и от всех других электрических источников, которые мы люди так любим использовать, конечно, будут взаимодействовать со всеми сигналами естественного происхождения. Хорошо известный авторитет в области полей однажды высказался следующим образом: «человеческое тело является электрической проводящей жидкостью – просто большой мешок с соленой водой. Любые колебания магнитного поля в проводящей жидкости возбуждают электрические токи. Это, конечно, воздействует на естественные электробиологические сигналы в человеческом теле. Как это повлияет на человеческий род в долгосрочной перспективе, мы не знаем».

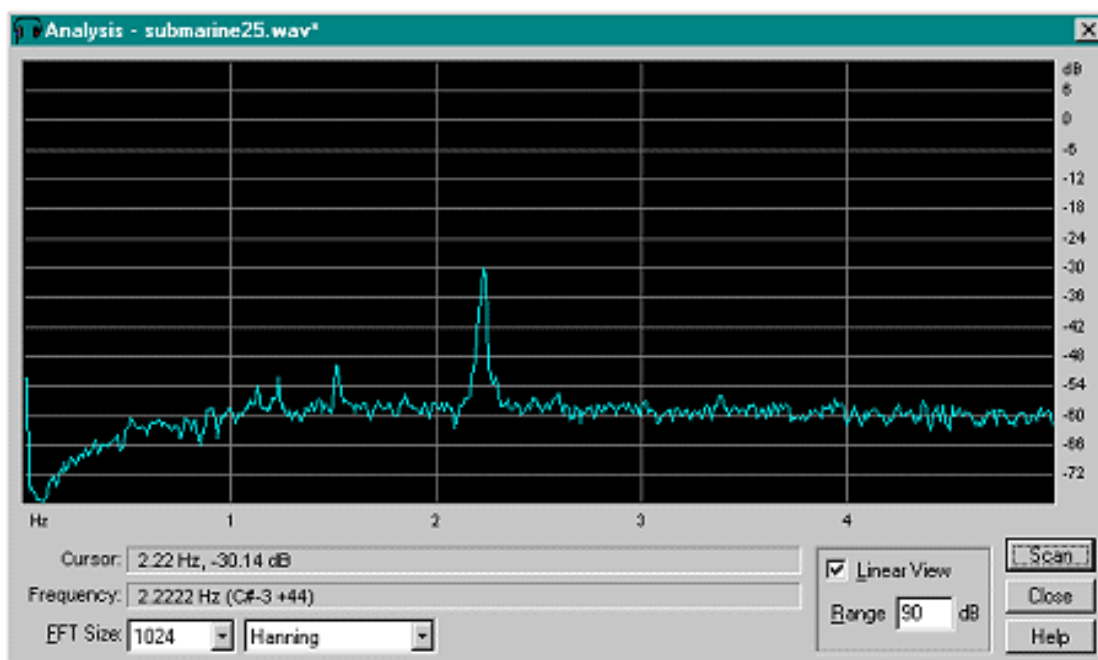


Очевидный факт, что большое число нетехнических писателей любят пугать, ссылаясь на HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program на Аляске) (за исключением российского дятла («Зевса» / ред.)) и на стандартные VLF передатчики для СНЧ излучения. Для всех таинственных вещей «зло» является наиболее подходящим определением. Передатчики, использующие высокие частоты, но с модуляцией сигналов в СНЧ и КНЧ диапазонах как некоторые высокочастотные

загоризонтные радары (Over The Horizon Radars, OTHR's), вовсе не СНЧ - передатчики.

То же относится к ионосферным нагревателям, таким как Eiscat и HAARP; СНЧ сигнал - это вторичный продукт ВЧ передачи.

С такими передатчиками как HAARP, которые модулируют полярный электроджет в СНЧ диапазоне, в прошлом были проблемы создания гигантских антенн. Теперь не только земля, но и ионосфера, действует как излучающий элемент. Ресурсы HAARP передатчика в Гаконе на Аляске используют этот эффект для пробных передач сигналов на подводные лодки США на частоте 2.2 Гц.



2.2 Гц неопознанное сообщение для подлодки, полученное Renato Romero в Италии /

Будущая направленность интересов и дорогостоящих усилий связана с исследованием новых типов искусственных СНЧ передатчиков, основанных как на использовании атмосферы (ионосферы / ред.) Земли, так и без нее. Имеются сведения, что Индийский Военно-морской флот, очень заинтересован в услугах СНЧ передатчика, чтобы связываться со своими подлодками (субмаринами) класса «Кило», созданными русскими.

**От редактора.** Курсивом выделены редакторские дополнения и правки

---

---

**Лисицын Ю.Д. (2013). Первые отечественные эксперименты по созданию приемно-передающих систем СНЧ-радиосвязи на морских объектах. // НИЦ связи ВМФ, Санкт-Петербург.**

Работу данного научно-практического семинара можно отметить некоторым эпитафием, который отражает смысл и эмоции всего происходящего, например: «Как здорово, что все мы здесь сегодня собрались». К сожалению, подобные семинары происходят весьма редко, хотя каждый, несомненно, ощущает их благотворное влияние на дальнейшую работу и общее мироощущение. Иногда этому способствует и периодический экскурс в прошлое, который позволяет установить объективные причинно-следственные связи, понять, почему мы находимся здесь и сейчас, мотивированно предвидеть ход дальнейших событий.

В связи с этим, в рамках данного семинара уместно напомнить, что 7 марта 1900 года Морской технический комитет доложил Морскому министру России, что: «Беспроволочный телеграф по дальности и скорости передачи, а также вследствие полной независимости от света и атмосферных условий представляет большое удобство для сигнализации на море, а по своей беззвучности и невидимости он становится даже незаменимым в некоторых исключительных случаях»<sup>1</sup>.

По результатам доклада приказано: «Теперь же приступить к устройству беспроволочного телеграфа и принять меры к тому, чтобы аппараты и все необходимые предметы для телеграфа без проводов могли быть изготовлены у нас самих в России и не зависеть от заграничных заводов».<sup>2</sup>

Несомненно, специалистам, связанным с исследованием взаимодействия электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой, известно, что эти усилия заказчика увенчались успехом, и к 1916 году была создана приемная изолированная антенна подводной лодки, позволившая обеспечить прослушивание на глубине до 10 м сигналы длинноволновой радиостанции мощностью 35 кВт, находящейся на удалении до 45 миль. Серия опытов по приему радиосигналов на подводной лодке в погруженном состоянии была проведена под руководством Иманта Георгиевича Фреймана, который экспериментально установил, что электромагнитная волна на границе раздела «воздух – вода» меняет свои параметры, а напряженность поля по мере углубления резко падает.<sup>3</sup>

Проблема сохранения скрытности действия морских сил обострилась с началом строительства в середине 50-х годов подводных лодок с ядерной энергетикой, которые получали возможность длительного пребывания в подводном положении, а связь вынуждала их периодически занимать перископное или надводное положение. Одно из перспективных решений этой проблемы предложено в докторской диссертации Павлова Петра Павловича, статья по материалам которой «Исследование электромагнитного поля ультранизкой частоты в морской воде, создаваемого вертикальным электрическим диполем, расположенным в атмосфере, в интересах осуществления односторонней связи с подводными лодками на большой глубине», принята к опубликованию 7 сентября 1966 г.<sup>4</sup> В статье сделана попытка приблизительно оценить дальности и глубины подводного радиоприема при использовании диапазона частот 1—100 Гц, однако, в то время сделанные в статье выводы представлялись спорными, требующими экспериментальной проверки и уточнения.

Такая проверка с задействованием штатного судна бортового размагничивания (СБР) и подводной лодки (ПЛ) Северного флота проводилась в июле-августе 1968 года в рамках НИР «Поиск» в выделенных районах размагничивания судов Мотовского залива. На первом этапе натурных испытаний макет тиристорного передатчика мощностью 25 кВт, изготовленного НИИ Постоянного тока размещался на СБР, а приемное устройство, разработанное Ленинградским политехническим институтом им. М.И. Калинина - на ПЛ. На втором этапе испытаний осуществлялась взаимная передислокация макетов передающей и приемной аппаратуры по объектам размещения с целью оценки возможности обеспечения двухсторонней связи с ПЛ на глубине.

Непосредственное руководство работами по подготовке и проведению испытаний осуществлял капитан 3 ранга Горбунов Борис Константинович, которому помогали капитан-лейтенант Михайлов В.И., капитан-лейтенант Панфилов А.С. и Акулов В.С.

Размещение и обслуживание макетов передающей и приемной аппаратуры осуществлялось представителями разработчиков Дмитриковым В.Ф., Беспаловым, Александяном. Авторский контроль за ходом работ осуществлял капитан 2 ранга Болтунов Н.И., которому принадлежала идея использования СБР для проведения таких испытаний.

Их успех во многом определялся качеством работы антенных устройств, изготовление, подключение и обслуживание которых в полном объеме возлагались на В.И. Михайлова. В качестве приемной антенны на обоих этапах испытаний использовалась буксируемая кабельная антенна длиной порядка 50 метров с латунными электродами и размещенными на ней механическими регистраторами глубины погружения, позволяющими контролировать ее реальное положение при буксировке СБР и погруженной ПЛ. Обычно, глубина погружения ходового конца приемной антенны при буксировке ее ПЛ составляла 50 – 70 метров.

<sup>1</sup> ЦГА ВМФ, Ф.900, оп. 22, д. 85, л. 94-96.

<sup>2</sup> М.А. Крупский. Исторический очерк Научно-исследовательского морского института связи. ВМФ, Л., 1971.

<sup>3</sup> Исторический очерк 1932 – 2012. НИЦ телекоммуникационных технологий ВУНЦ ВМФ «ВМА», СПб, 2012.

<sup>4</sup> Труды в/ч 60130, выпуск 1 (39), Л., 1969.

В качестве передающей антенны на первом этапе испытаний также использовалась электродная кабельная антенна, изготовленная из силового кабеля на рабочий ток до 150 А, длиной порядка 100 метров. На втором этапе испытаний для оснащения ПЛ передающей антенной использовалась штатная процедура поперечной обмотки ее корпуса силовым кабелем, которая производится на этапе подготовки ПЛ к размагничиванию. Через штатные герметичные разъемы обмотка из 11 витков подключалась к передатчику, размещаемому в прочном корпусе, который обеспечивал ее возбуждение на фиксированных частотах диапазона 10 - 100 Гц в режиме меандра.

Помимо организационных трудностей, связанных с обеспечением синхронной доставки в район испытаний двух единиц разнородных сил флота, основной проблемой для членов испытательной группы явились низкие мореходные качества СБР, у которого отсутствовал киль, вследствие чего при отходе от портовой стенки большинство членов испытательной группы подвергались жесточайшему воздействию морской болезни, препятствующей выполнению запланированной программы работ.

В целом проведенные проверки позволили получить экспериментальное подтверждение возможности генерации контролируемыми источниками достаточно интенсивных КНЧ-СНЧ полей для уверенной регистрации их на глубинах 40 - 100 метров при удалениях от 5 до 10 миль.

Несмотря на то, что в течение прошедших 45 лет вопрос о приоритете данных работ НИИ связи ВМФ по отношению к последующим исследованиям проблемы возбуждения и регистрации КНЧ-СНЧ полей не был представлен на обсуждение широких кругов специалистов, не означает отсутствие такого приоритета. Тем более, можно с уверенностью утверждать, что описанные события являются первыми отечественными экспериментами по возбуждению и регистрации СНЧ электромагнитного поля на Кольском полуострове.

С тех пор исследования по освоению диапазона сверхдлинных волн, а позднее сверхнизких и крайне низких частот стали главнейшими в работе многих отечественных и зарубежных научных организаций.

---

---

**Комлева Е.В. (2013). Геология, горное дело и ядерная энергия (выдержка из статьи) // Технический университет, Дортмунд, Германия. (Elena Komleva. Geology, Mining and Nuclear Energy, E-mail: komleva\_ap@mail.ru).**

TU Dortmund University, Germany

Рассмотрены некоторые антропосоциальные аспекты феномена ядерной энергии. Они сопряжены с первой попыткой создания международного подземного могильника ядерных материалов вблизи Красноярска. В приведенной выдержке из статьи отмечены проблемы, которые идентифицированы с таким сопряжением на примере Кольского полуострова и СНЧ-источника Зевс.

Печенгская структура по праву должна рассматриваться как уникальное геологическое (с комплексом других привлекательных для решения проблемы подземного ядерного могильника черт) место Кольского полуострова и России. Как научно-технологический полигон для международных объектов MegaScience. Печенга – непревзойденный стандарт степени геологической изученности (советский, ставший по наследству российским) и, возможно, качества породных массивов. Здесь (как нигде еще) даже граница мантии установлена точно, по данным геофизики и бурения (А. Жамалетдинов, <http://geoksc.apatity.ru/images/stories/Print/zh21.pdf>).

На Мурмане расположена уникальная установка сверхнизкочастотного с поверхности зондирования и мониторинга земных недр «Зевс». С помощью этой установки уже проводился поиск мест для захоронения радиоактивных отходов (<http://www.rit.informost.ru/rit/3-2002/4.pdf>). И могут передаваться под землю ключевые команды в экстренной ситуации аналогично управлению АПЛ. При использовании других технических средств имеются предпосылки и беспроводного контроля этим методом подземного объекта и вмещающего массива изнутри (Е. Терещенко, <http://www.kolasc.net.ru/russian/news/vestnik/vestnik-1-2013.pdf>).

Необходимо приветствовать попытки новых разносторонних исследований применительно к данной площади. Такая высокая планка подхода к знаниям о литосфере и критериям ее пригодности, наиболее адекватна задаче создания природно-техногенного объекта в недрах Земли.

Благодарю за поддержку исследований профессора Brigitte Falkenburg.

---

---

**Баикуев Ю.Б. Воспоминания участника СНЧ - работ в Забайкалье в 1977 – 1991 годах // Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, E-mail: buddich@mail.ru**


С СНЧ тематикой я познакомился в 1974 году, когда в Забайкалье на нашей базе Бурятского института естественных наук Сибирского отделения АН СССР (БИЕН СО АН СССР) вблизи поселка Хоринск работал отряд Института радиофизики АН Украины из Харькова в составе В. Безродного, В. Бормотова и В. Оношко.

Они регистрировали Шумановские резонансы в полосе 1 - 40 Гц. Результаты этих экспериментов отражены в известной книге П. Блюха, А. Николаенко и Ю. Филиппова «Глобальные электромагнитные резонансы полости «Земля-ионосфера». Тогда наш отдел радиофизики БИЕН тесно сотрудничал со многими радиофизическими институтами СССР, в том числе и с кафедрой радиофизики ЛГУ и ОКТБ «Радиофизика», возглавляемыми проф. Г.И. Макаровым. В области распространения СДВ-ДВ-СВ радиоволн мы занимались радиоэлектромагнитным зондированием (РЭМЗ) и геоэлектрическим картированием территории востока СССР и сопредельных стран.

В июне 1977 года заведующий отделом проф. Ч.Ц. Цыдыпов направил меня в Институт радиотехники и электроники АН СССР на совещание по СНЧ тематике, которое проводил проф. Н.А. Арманд. Здесь я познакомился с Владиславом Васильевичем Акиндиновым - зав. лабораторией Фрязинской части ИРЭ и Анатолием Митрофановичем Рязанцевым – ст.н.с. этой же лаборатории. Мы обсудили поставленную задачу и договорились, что в сентябре полевой отряд ИРЭ с аппаратурой приедет для экспериментов в Бурятию. В районе пади Ангир Прибайкальского района мы выбрали «тихое» в электромагнитном отношении место и две недели проводили эксперименты в СНЧ диапазоне по приему искусственных сигналов. В отряде ИРЭ были А. Рязанцев, Н. Тетекин, Л. Потапова, А. Гугин, С. Еремин. Эксперименты продолжались и в 1978 и 1979 годах. Мы ездили во Фрязино, фрязинцы – к нам.

Летом 1979 года в Улан-Удэ приехал председатель Секции прикладных проблем АН СССР генерал-лейтенант, д.т.н., проф. Юрий Васильевич Чуев. Наш директор БИЕН чл.-корр. АН СССР Марк Васильевич Мохосоев ознакомил его с тематикой отдела радиофизики и показал наш СНЧ - стационар «Горячинск» на берегу озера Байкал. По рекомендации Ю.В. Чуева в сентябре 1979 года в БИЕН прибыла большая делегация Минпромсвязи СССР. Сибирское отделение АН СССР начинало многолетнее сотрудничество с отраслью. В результате переговоров было достигнуто соглашение о выделении дополнительных штатов и начале работ по СНЧ тематике по теме «Ольхон». Работы проводились совместно с лабораторией электрических свойств горных пород Института земной коры ЛГУ, которой руководил проф. А.В. Вешев. Ответственным исполнителем СНЧ тематики был к.г.-м.н. Александр Васильевич Яковлев. Многих сотрудников лаборатории я хорошо знал еще с начала семидесятых годов. Это к.г.-м.н. Виктор Григорьевич Ивочкин, Михаил Иванович Пертель, Петр Парфентьев, Евгений Алексеев и другие. От заказчиков работ НПО им. Коминтерна мы сотрудничали с Юрием Эммануиловичем Удальевым и Леонидом Аврамовичем Собчаковым, от моряков – связистов - с Виктором Ивановичем Агапоновым, Виктором Ефимовичем Пониматкиным, Александром Сергеевичем Панфиловым, Львом Борисовичем Песиным и Игорем Анатольевичем Скоковым.

Экспериментальные исследования взаимодействия СНЧ-радиоволн с земной корой на востоке России проводились с целью поиска участка земной коры размерами не менее 100 км x 100км 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» для частоты 40 Гц. Одновременно обрабатывалась методика и техника СНЧ-зондирования с использованием поля установки «Зевс» и проводились аэросъемочные работы в СДВ диапазоне радиоволн на перспективных участках. Летом 1980 года аэроработы проводились на Витимском плоскогорье, в районе Еравнинского рудного узла. От ИЗК ЛГУ в полетах участвовал В.Г. Ивочкин - разработчик СДВ бортовой аппаратуры, большой энтузиаст СДВ метода. С ним мы летали еще в сентябре 1981 года на Алданском щите и в мае 1984 года на Конкудеро-Мамаканском нагорье. Для полетов по 6 категории сложности Восточно-Сибирское управление гражданской авиации выделило экипаж летчиков Киренского авиаотряда, который имел большой опыт работ в горно-таежной местности Сибири. Тогда не было ГЛОНАСС-GPS систем, и качество работ сильно зависело от профессионализма штурмана. Таких специалистов были единицы на всю Восточную Сибирь. Всего на СДВ - аэроработы на востоке СССР было затрачено около 600 летных часов.



ВОЙСКОВАЯ ЧАСТЬ  
60130

ПРЕДСЕДАТЕЛЮ БУРЯТСКОГО ФИЛИАЛА  
СО АН СССР  
члену-корреспонденту АН СССР  
М.В. МОХОСОЕВУ

28 ноября 1985.  
г. Ленинград, 198135

г. Улан-Удэ, ул. М. Сахьяновой, 6  
Бурятский филиал Сибирского Отделения  
АН СССР

Глубокоуважаемый Марк Васильевич!

Лаборатория радиогеофизики руководимого Вами Института естественных наук проводит во исполнение постановления ЦК КПСС и СМ СССР № 940-321 экспериментальные исследования в различных районах Сибири и Дальнего Востока. Работы проводятся в труднодоступной горно-лесистой местности в различные сезоны года. Для эффективной работы необходима транспортная техника высокой проходимости типа ГАЗ-71, Урал-375.

Прошу Вас оказать содействие в выделении лаборатории геофизики автомобиля повышенной проходимости для выполнения экспериментальных работ в XII пятилетке по теме "Тамсаг-АН".

ВРИО КОМАНДИРА ВОЙСКОВОЙ ЧАСТИ 60130-3

Г.В. ЗАЙЦЕВ

Заказчики работ строго придерживались графика выполнения экспериментов и 2-3 раза в год проводили рабочие совещания и приемку этапов работ. Следует отметить их большую помощь в оперативном решении множества практических вопросов, таких как получение разрешения на производство полетов, выделение резерва горючего для отдаленных северных аэродромов, первоочередное получение приборов и оборудования. Примером может служить письмо из в/ч 60130 директору БИЕН (фото). Весь запрашиваемый автотранспорт был получен.

Полезными и результативными были и проверки качества и уровня проводимых исследований в БИЕНе. В октябре 1983 года, без предварительного согласования, в Улан-Удэ прибыла делегация Главного штаба ВМФ в составе капитана 1 ранга В.И. Агапонова, капитана 2 ранга В.Е. Пониматкина и капитана 3 ранга И.А. Скокова. Ознакомившись с реальным состоянием дел и высоко оценив полученные результаты, комиссия попросила директора БИЕН М.В. Мохосова организовать вылет в район строящейся трассы БАМ и автодороги Таксимо-Бодайбо. В Улан-Удэнском авиаотряде был срочно подготовлен для дальнего перелета вертолет МИ-8 и осуществлена экспедиция в заданный район. Комиссия осмотрела с воздуха место будущих детальных работ и убедилась, что выбранный плоскогорный участок вполне подходит для размещения проектируемого объекта. Побывала комиссия и на озере Байкал. На СНЧ стационаре «Горячинск», где ширина озера достигает 60 км, а глубина 1620 метров, членов комиссии очень удивила пресная байкальская вода. Они по несколько раз опускали ладони в чистую воду, пили ее и говорили: «Настоящее море, а вода не соленая!».

В сентябре 1983 года мы с к.ф.-м.н. В.Б. Хаптановым отработали полностью аппаратуру и методику СНЧ радиоимпедансных зондирований на 20 пунктах измерений участка «Удинский» и уже в ноябре представили их на совещании по СНЧ тематике в Таллине. Оно проходило в старинном здании в центре города, в хозяйстве контр-адмирала Ивана Ивановича Меркулова. Участниками совещания были А.В. Вешев, А.В. Яковлев, Ю.Э. Удальев, Л.А. Собчаков, В.И. Агапонов, В.Е. Пониматкин и другие. Договорились сосредоточить все работы в одном районе. Исследования на Алданском щите и Буреинском массиве были закончены.

В апреле-мае 1984 года были выполнены аэроработы в СДВ диапазоне на Конкудеро-Мамаканском нагорье. От ИЗК ЛГУ участвовал В.Г. Ивочкин. К июлю материалы аэроработ были обработаны и полевой отряд БИЕН (В.Б. Хаптанов, Б.Ш.Ч. Батуев, Ю.Б. Башкуев) был расквартирован в поселке Бисяга на реке Витим. Других поселков на левом берегу реки не было, но были сносные лесовозные дороги. Весь август и сентябрь мы проводили СНЧ зондирования на 4 частотах в 15 пунктах. Отряд ИЗК ЛГУ также работал в этом районе методами ВЭЗ и ЕЭМП. Руководил отрядом А.В. Яковлев. На пункты наблюдений отряд доставлялся вертолетом МИ-8 с подбором места высадки с воздуха. Из членов отряда ИЗК, кроме А.В. Яковлева, я тесно взаимодействовал с Женей Алексеевым и Лешей Ерофеевым. В 1985 и 1986 годах СНЧ эксперименты проводились, в основном, на участке «Удинский» и в зимнее время – на льду озера Байкал. Эту уникальную природную лабораторию мы использовали много раз для калибровки СНЧ-СДВ-ДВ-СВ аппаратуры и других экспериментов. Существование в зимнее время «квazi»-однородного геоэлектрического разреза толщиной до 1620 метров на водной среде позволило хорошо откалибровать СНЧ аппаратуру в натуральных условиях и снять диаграммы направленности датчиков электрического и магнитного полей.

Очень интересные эксперименты по распространению СНЧ радиоволн были выполнены летом 1986 года, когда «Зевс» излучал гармонические сигналы на 4 частотах в течение 12 часов. В 1987-1989 годах СНЧ эксперименты были полностью сосредоточены на Конкудеро-Мамаканском нагорье. Они проводились только на частоте 82 Гц вдоль заданной трассы по направлению «восток-запад». Отряды БИЕН и ИЗК часто жили вместе на базе Мегетской геофизической экспедиции треста «Иркутскгеофизика». Чтобы получить больше фактического материала, пункты наших наблюдений обычно не совпадали, но были выполнены контрольные измерения в нескольких общих точках. Кроме того, вертолет МИ-8 не мог одновременно принять 10-12 человек и всю громоздкую и тяжелую измерительную аппаратуру. В нашем отряде только бензоагрегат АБ-2 весил около 180 кг, и его приходилось снимать с висящего в воздухе вертолета прямо на курумы.

Летом 1989 года полностью обследованную площадку принимала Государственная комиссия. В ее составе было около 30 специалистов различного профиля, включая заказчиков, проектировщиков, энергетиков, геологов и санитарных врачей. Для проживания комиссии местная администрация выделила и оборудовала новый многоквартирный деревянный дом. Членов комиссии интересовали многие конкретные вопросы, включая пробы образцов грунта и химико-биологический состав воды горных рек.

В июле-августе 1990 года наш отдел радиофизики БИЕН проводил Всесоюзное совещание по приземному распространению радиоволн и электромагнитной совместимости. Руководителем секции «Радиофизические свойства земной коры и их влияние на распространение радиоволн» был приглашен Ю.Э. Удальев. Он прилетел из Ленинграда в Улан-Удэ, руководил секцией и выступил с докладом «Определение геоэлектрического разреза земли по данным измерений входного сопротивления приземных антенн». Соавторами доклада были Л.А. Собчаков и А.В. Яковлев.

Я до сих пор бережно храню подаренный мне Ю.Э. Удальевым сувенир – большой медный парусный кораблик, очень похожий на кораблик на Адмиралтейском шпиле. В программу совещания входила и поездка на Байкал. Группу ленинградских участников в составе сотрудников ОКТЬ «Радиофизика» Н.П. Тихомирова, А.А. Пылаева и Ю.Э. Удальева мы повезли на наш СНЧ стационар в поселок Горячинск. Как всегда в солнечной Бурятии была замечательная погода, и буквально за 20 - 25 минут солнечных ванн наши северные «бледнолицые» коллеги успели получить значительное покраснение кожного покрова. Мы настойчиво предупреждали их, что более 5 минут на открытом солнце быть не рекомендуется, что у нас юг Сибири, а не

Балтика. Отмечу, что берега Байкала в районе курорта «Горячинск» очень напоминают Рижское взморье. Мы проводили всех участников Совещания бодрыми и здоровыми.

В сентябре 1990 года пришла страшная весть о трагической гибели отряда А.В. Яковлева. Ее нам сообщил Петр Парфентьев. Чуть позже сообщили о кончине от сердечного приступа Ю.Э. Удальева. Эти трагедии мне никогда не забыть.

Сотрудничество с ИЗК ЛГУ, НПО им. Коминтерна, Кольским научным центром АН СССР и моряками было очень продуктивным и интересным. В течение 11 лет мы проводили совместные исследования в различных районах Сибири и Дальнего Востока, выбрали площадку размером 250 x 70 км для размещения антенны и сдали ее государственной комиссии. В эти же годы удалось создать молодой коллектив лаборатории радиогеофизики, состоящий из выпускников Московского, Ленинградского, Новосибирского, Томского, Иркутского университетов, МФТИ, ИрГТУ, ХАИ.

К сожалению, после 1991 года финансирование СНЧ исследований прекратилось. Мы перезванивались с Л.А. Собчаковым, проводили по его просьбе эпизодические измерения на более низких частотах, планировали использование установки «Гефест».

В последние годы моя лаборатория занимается сейсмоэлектромагнитными процессами и явлениями в Байкальской рифтовой системе. Коллектив лаборатории сократился с 25 человек в 1990 году до 11 человек в 2013 году, но костяк удалось сохранить. Все основные участники СНЧ исследований стали кандидатами наук. Мы тесно сотрудничаем с Институтом солнечно-земной физики СО РАН, Институтом земной коры СО РАН и Геологическим институтом СО РАН по интеграционным проектам СО РАН. Координаторами работ являются академик Г.А. Жеребцов и чл-кор. РАН А.П. Потехин из ИСЗФ СО РАН (Иркутск). Тематика включает в себя и СНЧ диапазон.

Сложность работы состоит в слабом финансировании исследований. Вследствие этого трудно оснастить экспериментальные установки новым цифровым оборудованием. В новых условиях работы научных подразделений РАН необходимо вернуть актуальность СНЧ тематике и сформировать на базе имеющихся научных лабораторий РАН и ВУЗов комплексный междисциплинарный коллектив российских ученых и инженеров для решения практических задач в интересах развития народного хозяйства и обороны страны.

#### Список литературы

1. 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.
2. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Глубинные радиоимпедансные зондирования земной коры с использованием электромагнитного поля СНЧ радиоустановки. Физика Земли. 2001. №2. с. 75-84
3. Bashkuev Yu.B. and Khaptanov V.B. Results on “Zeus” station application for electromagnetic sounding of seismoactive area // Seismo Electromagnetics: Litosphere-Atmosphere- Ionosphere, Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov, 2002 by TERRAPUB, Tokyo. p.p. 239-247.

---

**Жамалетдинов А.А. Краткие воспоминания участника работ с СНЧ-источником Зевс по двойному назначению в 1990-2013 гг. // Геологический институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, e-mail: abd.zham@mail.ru**

*Посвящается светлой памяти  
Александра Васильевича Яковлева,  
Леонида Авраамовича Собчакова и  
Льва Борисовича Песина*

Первый раз о новом научном направлении, объединяющем интересы Военно-морского флота (ВМФ) и глубинной геоэлектрики, я узнал от Александра Васильевича Яковлева и Анатолия Митрофановича Рязанцева в 1975-76 гг., а также из статей С.Л. Бернштейна и др., (1974) и В.В. Акиндинова и др., (1976). Речь шла о сверхнизкочастотной (СНЧ) радиосвязи, с помощью которой имеется возможность передавать и принимать информацию под водой, для связи с погруженными объектами и под землей для мониторинга атомных взрывов и для других целей. Пробные испытания СНЧ-радиосвязи в СССР производились с использованием высоковольтной линии электропередачи (ЛЭП) «Кола-Серебрянка» (ВЛ-401), находившейся тогда на стадии строительства. Я со своими коллегами в эти годы был полностью поглощен разворачивавшимися под руководством академика Е.П. Велихова работами на полуостровах Средний и Рыбачий по глубинному зондированию земной коры с применением магнитогидродинамического (МГД) генератора «Хибины» мощностью 80 МВт. Поэтому особого внимания на эти сведения не обратил. Позднее, в начале 80-х годов Игорь Матвеевич Зархи сообщил мне о двух линиях электропередачи, установленных на Мурманском блоке и предназначенных для СНЧ-радиосвязи. Но и эта информация, переданная мне под большим секретом, не привлекла моего внимания.

И только в начале 1990 года, когда работы с МГД-генератором были практически свернуты, я откликнулся на предложение Александра Васильевича Яковлева и Леонида Авраамовича Собчакова провести геофизические измерения с применением СНЧ-антенны «Зевс». Мы получили приличный по тем временам договор на 20 тысяч рублей. В условия договора входило измерение сигналов антенны «Зевс» и оплата аренды вертолета для геофизических исследований А.В. Яковлева.

А.В. Яковлев, под научным руководством профессора ЛГУ Александра Васильевича Вешева, проводил работы в июле-августе на восточном продолжении антенны «Зевс» для определения возможного наращивания ее длины с целью увеличения излучающего момента источника «Зевс». Мы проводили измерения вдоль дороги Кола-Серебрянка и за ее пределами. Работы свои мы выполняли в мае, когда генераторная установка «Зевс» находилась на профилактическом ремонте. Ток подавался в антенну «Зевс» путем подключения к ней генератора ЭРС-67 мощностью 29 кВт на частоте 0.25 Гц. Несмотря на конец мая, в районе Североморска-3 сплошным покровом лежал снег. Поэтому разбивку приемных линий мы делали на лыжах. В измерениях и обработке сигналов принимали участие практически все сотрудники недавно созданной лаборатории геоэлектрики – А.Д. Токарев, А.Н. Шевцов, В.Э. Асминг, Ю.А. Виноградов, Н.В. Очкур, В.М. Гуревич, А.Г. Ямпольский. Мы не преминули провести измерения сигналов не только на малых, но и на больших удалениях от антенны «Зевс» – до 200 км (вставка на рис. 1а). Были получены новые интересные результаты. Но наше настроение сильнее всего омрачило известие о трагедии, разыгравшейся 17 августа 1990 года в 17-34. В районе Ловозера на высоте 2.3 км потерпел катастрофу вертолет К-32. Погибли – 4 пилота и 7 наших коллег-универсалов. Среди них – Саша Яковлев, мой университетский старший друг, и двое братьев Голубевых. Их можно увидеть на фото 9 в разделе «Фотогалерея», где приведен рабочий эпизод 1987 года из архива Ю.Б. Башкуева.

Я вылетел на место падения вертолета в составе Правительственной комиссии и разбираю обугленные трупы, опознавая товарищей. Потом вывозил их сначала в брезентовых мешках в Ловозеро и затем уже в оцинкованных ящиках в Ленинград. Из обгоревшей походной сумки Саши Яковлева мне удалось извлечь полевые дневники и восстановить полученные результаты наблюдений. Ниже, на рис. 1 привожу сохранившуюся схему расположения полевых работ его и нашего отрядов. Все деньги от хоздоговора, за вычетом расходов на аренду вертолета, мы перечислили семьям погибших коллег из Ленинградского университета.

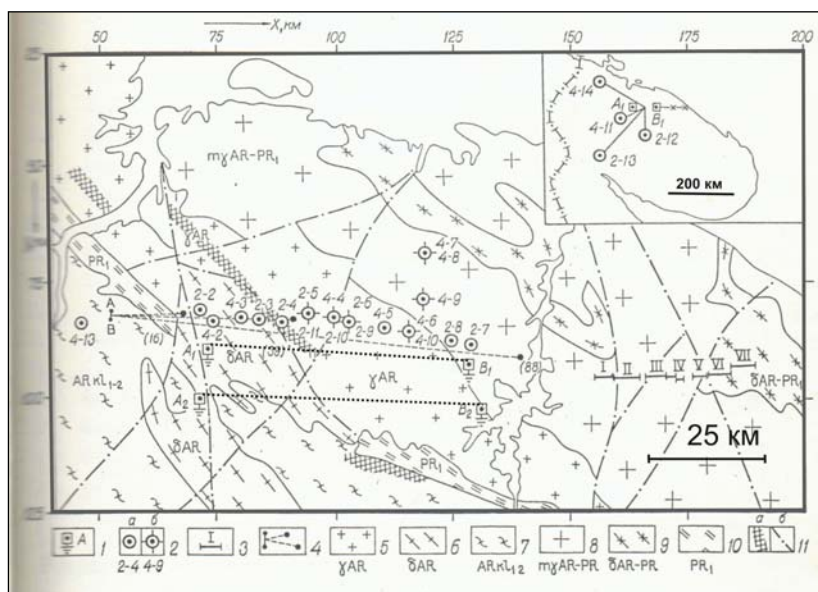


Рис. 1. Схема расположения геофизических работ 1990 года в районе источника «Зевс».

Условные обозначения:  
 1 – заземления антенны источника «Зевс», 2 – пункты наблюдений ГИ КНЦ РАН, 3 – профили измерений отряда А.В. Яковлева (НИИ ЗК ЛГУ), 4 – установка частотного зондирования, 5-10 – гранитогнейсовые комплексы Мурманского блока, 11 – разломы.

С гибелью А.В. Яковлева и его коллег геофизические работы на источнике «Зевс» не прекратились. Больше того – появилась настоятельная необходимость в их продолжении и усилении. Дело в том, что начало 90-х годов, как известно, ознаменовалось крутыми переменами в экономической и политической жизни страны. Перемены эти коснулись и установки «Зевс». Из-за резкого подорожания стоимости электроэнергии, а также сокращения финансового обеспечения источник «Зевс» потерял возможность работать в «штатном» режиме. Возникла угроза полной остановки станции, так как персонал терял квалификацию. В этих условиях, по инициативе тогдашнего командира «Зевса» Геннадия Михайловича Кадышевича и ведущего инженера капитана 2 ранга Юрия Тимофеевича Подберезкина, Геологический институт КНЦ РАН обратился к губернатору Мурманской области Юрию Алексеевичу Евдокимову с просьбой о выделении «Зевсу» льготного энергообеспечения. В письме сообщалось, что установка имеет двойное назначение и приносит пользу не только ВМФ, но и народному хозяйству Мурманской области, способствуя разработке современных технологий изучения глубинного строения рудных полей. Просьба была удовлетворена, и «Зевс» заработал. Но применение его для решения конкретных геолого-геофизических задач оставалось, в основном, на словах,



несмотря на усилия энтузиастов этих работ Л.А. Собчакова и Л.Б. Песина. Реальному воплощению идеи конверсии препятствовала необходимость работы «Зевса» в режиме постоянной боевой готовности выйти на связь по первому вызову. Кроме того, оборудование «Зевса» старело и плохо переносило смены частотного режима, столь необходимые геофизикам для электромагнитного зондирования земной коры. Тем не менее, целый ряд интересных работ нам удалось провести.

**В 1991 году** А.Н. Шевцовым, А.А. Каменским и А.Д. Токаревым (ГИ КНЦ РАН) с помощью станции ЭРС-67, подключенной к антенне «Зевс», были выполнены частотные зондирования в Цагинском и Федорово-Панском районах Кольского полуострова. Эти работы показали возможность прослеживания рудо-перспективного железо-титанового горизонта на глубине 2 км, подсеченного в одном месте скважиной и подтвержденного электрическим каротажем и нашими наблюдениями.

**В 1992 году** состоялась экспедиция в Финляндию совместно с отрядом Института океанологии РАН (Николай Пальшин, Владимир Егоров). От ГИ КНЦ, помимо меня, участвовали А.Д. Токарев и А.Н. Шевцов. Основная задача экспедиции, сформулированная профессором Л.Л. Ваньяном, заключалась в измерении сигналов Финско-Шведской ЛЭП постоянного тока. Попутно (для подстраховки работ) я захватил «за бугор» аппаратуру для измерения сигналов источника «Зевса» и заранее согласовал сетку частот и режимы работы, не вдаваясь в мелкие детали. Измерения сигналов «Зевса» выполнялись с аналоговой станицей А.Н. Васильева, С.А. Носкова и С. Воронина, основанной на принципе супергетеродина, с последующей записью разностной частоты 5 Гц на цифровую станцию ЦАИС (СЧЗ-ЦАИС). Первые измерения сигналов, выполненные в районе базового лагеря, не дали положительного результата. Сигнал не был виден за помехами. Казалось, что все напрасно. Но мы с А.Д. Токаревым выехали на север, ближе к источнику, в пределы Центрально-Финляндского гранитоидного массива, в точку Паркано. Измерительные линии длиной по 500 м расставляли в кромешной тьме через густые завалы засохших поваленных деревьев. И – о чудо! Сигналы вырисовались совершенно четко на электрических и на магнитных каналах (Рис. 2б). После этого мы записали еще более отчетливые сигналы южнее базового лагеря, на гранитоидном массиве Рапакиви на удалении 1000 км от источника и менее уверенные сигналы на удалении 1100 км в районе Турку (Рис. 2а).

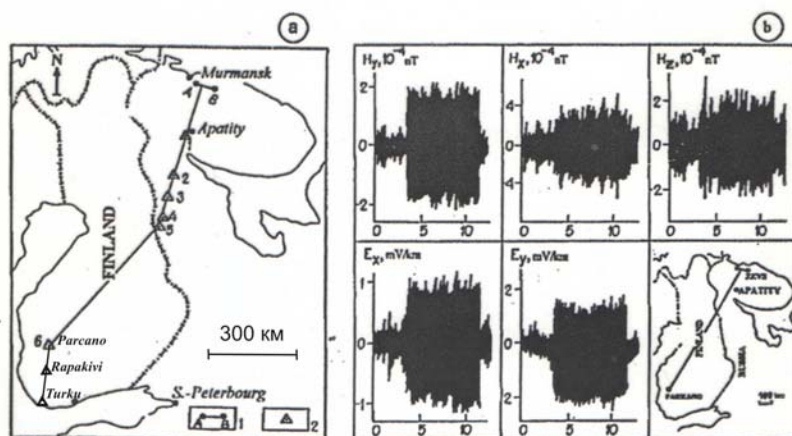


Рис. 2. Пример регистрации сигналов источника «Зевс» в реальном времени на удалении 900 км в точке Паркано (Финляндия).

Когда на основе полученных результатов была подготовлена статья в журнал «Доклады РАН» [Велихов и др., 1994], руководитель работ академик Е.П. Велихов при мне позвонил начальнику связи Ю.М. Кононову и спросил – можно ли публиковать. Юрий Михайлович ответил утвердительно, сославшись на то, что «Зевс» уже нашумел по всей планете и все его давно «застукали». Так состоялся выход «Зевса» в свет, в открытую печать.

**В 1993 году** состоялась новая советско-финская экспедиция, на этот раз на территории СССР, в Карелии. Мы провели измерения сигналов «Зевса» в точках 2-5, показанных на рис. 2а. Результаты этих наблюдений, совместно с данными, полученными в предыдущем году в Южной Финляндии, позволили нам отчетливо увидеть влияние ионосферы и влияние токов смещения на характер наблюдаемых полей. Изучением этих двух явлений мы занимались несколько последующих лет в рамках гранта РФФИ 96-05-64387 «Влияние ионосферы на результаты электромагнитных зондирований с мощными контролируруемыми источниками». В рамках этого гранта разрабатывали способы учета ионосферы и токов смещения на результаты глубинных электромагнитных зондирований. Но все же самым ярким событием 1993 года для нас явилось обнаружение с помощью источника «Зевс» сильнейшего статического смещения кривых кажущегося сопротивления, вызванного неоднородностью тонкого слоя морены. Обнаружили мы его путем проведения измерений сигналов «Зевса» при двух длинах измерительных линий - 100 м и 700 м. Амплитуда электрического сигнала при этом увеличилась не в 7 раз, как полагается, а в 21 раз. Соответственно, кажущееся сопротивление возросло по электрическому полю в 3 раза, а по импедансу – почти в 10 раз. Это обнаружение помогло уточнить методику изучения параметров «нормального» разреза литосферы и легло в основу Международного гранта Дж. Сороса и Правительства РФ. Рег № RLZ-000 и RLZ-300 «Нормальная кривая кажущегося сопротивления Балтийского щита по результатам зондирований с естественными и контролируруемыми источниками в диапазоне периодов от 0.001 до 1000 с.

По итогам накопленных материалов экспериментальных и расчетно-теоретических работ я сделал доклад на Президиуме РАН **19 декабря 1995 года** о перспективах применения СНЧ-антенны «Зевс» в рамках

конверсии для поиска полезных ископаемых, глубинной геофизики и для прогноза землетрясений. Текст доклада приведен в главе 5 настоящего сборника. В прениях выступил академик Николай Павлович Лаверов. Он поддержал предлагаемую программу и привел наглядный пример по Сахалину об эффективности электромагнитного мониторинга землетрясений в комплексе с сейсмологическим прогнозом. Надо сказать, что прямо к докладу подоспела телефонограмма от Александра Карповича Сараева. В телеграмме он сообщал с Северного Кавказа, что там проведена успешная регистрация сигналов источника «Зевс» и что это является обоснованием целесообразности его применения для мониторинга предвестников землетрясений.

В 1996 году мы провели экспедиционные наблюдения сигналов источника «Зевс» по профилю, протяженностью 1200 км от г. Апатиты до Ладоги. Мы использовали новый комплект измерительной аппаратуры на супергетеродине с предусилителями на оптронах. Полученные результаты, наряду с новыми данными, указали нам на ряд недостатков и на необходимость кардинального обновления парка измерительной аппаратуры. Применение супергетеродина позволяло с высокой точностью регистрировать сигналы контролируемых источников на жестко заданных дискретных частотах, но полностью отрезало нам возможность измерения полей естественных источников для проведения МТ-АМТ зондирований в дополнение к частотному зондированию.

В 1997 году, с 12 по 22 мая состоялась служебная командировка в Китай с делегацией от ВМФ по проблеме двусторонних исследований в области разработки и применения мощных контролируемых источников СНЧ диапазона. Возглавлял делегацию Лев Борисович Песин. В составе делегации были Геннадий Степанович Нероба (комиссар), Леонид Авраамович Собчаков, Александр Карпович Сараев, Борис Константинович Горбунов, Валерий Семенович Акулов. Было очевидно, что проблема прогноза являлась лишь прикрытием. Китайской стороне нужна была готовая СНЧ-установка для связи с подводными лодками. А что было нужно нашей стороне я не знал и не вдавался в детали, т.к. моя задача была сугубо гражданская, связанная с интерпретацией результатов зондирования земной коры в СНЧ диапазоне.

В том же 1997 году состоялась Международная экспедиция «Белое море - Умба». В экспедиции участвовали сотрудники Университета Оулу с широкодиапазонной АМТ-МТ аппаратурой, НИИ ЗК СПбГУ с аппаратурой АКФ-2 и мы, ГИ КНЦ РАН с аппаратурой СЧЗ-95 для зондирований с СНЧ источником «Зевс». Финские коллеги (Тойво Корья и Эрне Маркко) привезли с собой большой парк МТ-АМТ аппаратуры на феррозондах и индукционных датчиках. Сильно измучили меня таможенные проблемы, связанные с перевозкой геофизической аппаратуры из Финляндии в Россию и обратно. Я все это преодолел, но как оказалось, напрасно. Никаких результатов не получилось по непонятной мне причине. То ли финская аппаратура оказалась неисправной, то ли данные пропали в чреве компьютеров, то ли потому, что уволили Маркко, который всем этим владел. В экспедиции участвовал и сотрудник НИИ ЗК СПбГУ Володя Романов с аппаратурой АКФ-2. Надеялся я на него, но и он ничего толкового не получил. В итоге мы смогли получить неплохие результаты только за счет источника «Зевс». Они представлены на рис. 3 в виде глубинного геолого-геоэлектротического разреза по линии «Белое море-Умбозеро-Контозеро-Баренцево море» протяженностью около 300 км.

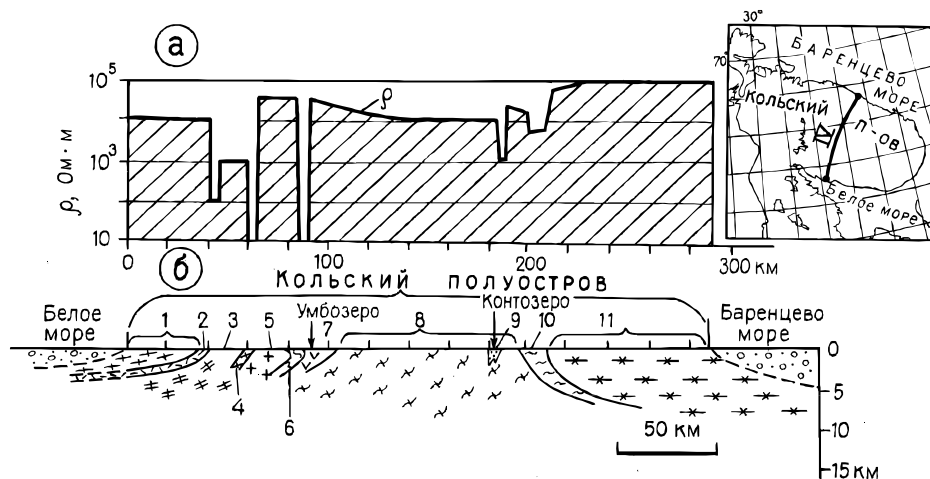


Рис.3. Результаты электромагнитных зондирований с источниками «Хибины» и «Зевс» по профилю «Белое море-Умбозеро-Контозеро-Баренцево море» (положение профиля обозначено под номером IV на врезке).

а – разрез удельного электрического сопротивления; б – геологический разрез по результатам зондирований в комплексе с другими геолого-геофизическими данными (по В.И. Пожиленко и А.А. Жамалетдинову). Цифрами обозначены геологические комплексы: 1 –умбинские гранулиты; 2 – Порьегубско- Умбинская зона надвига; 3 –супракрустальные образования; 4 –кислогубские гнейсы-ультраблестомилониты; 5 – Ингозерский блок; 6 – томингская сланцевая серия; 7- центральная зона Имандра-Варзуги; 8 – Центрально-Кольский блок; 9 – Контозерская кальдера проседания; 10 – зона Колмозеро-Воронья; 11 – Мурманский блок.

**В 1998 году** появился интерес к источнику «Зевс», связанный с изучением влияния лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность земной коры. Инициатором этого направления стал А.К. Сараев. Мы к нему примкнули и за короткое время получили ряд вдохновляющих результатов. Опубликовали по этой теме ряд статей в центральной печати. Однако, на этом дело и остановилось, поскольку добиться полной повторяемости лунных возмущений в электромагнитном поле не удалось. Обнаружился заманчивый круг соблазнительных совпадений, напоминающий ситуацию, повсеместно наблюдаемую в проблеме сейсмического и электрического мониторинга предвестников землетрясений.

В том же 1998 году на геомагнитной школе в Синае я выдвинул проект мониторинга землетрясений в Румынии в поле источника «Зевс» по следам крупного землетрясения в Бухаресте. Проект поддержал директор Института геодинамики Румынии Зугравеску при посредничестве Димитру Станика. Приступили к составлению межакадемического проекта, но инициативу перехватил А.К. Сараев. Он поднял аналогичную кампанию мониторинга с источником «Зевс» в Китае и увлек китайцев во главе с Жао-Го-Дзэ. Необходимо отдать должное. Александру Карповичу. Он не посрамил Российскую науку и сумел провести успешную регистрацию сигналов источника «Зевс» со своей аппаратурой АКФ-2 в Китае на удалениях до 5-7 тыс. км.

**В 1999-2000 годах** начался еще один новый виток интересов к источнику «Зевс», связанный с переходом на КНЧ диапазон, то есть на частоты в единицы и первые десятки герц. Разработка этого направления определялась необходимостью увеличения глубины передачи сигналов на погруженные субмарины с десятков до первых сотен метров. Первые работы выполнил Л.А. Собчаков совместно с С.В. Поляковым. Он изготовил генератор Кола мощностью 100 кВт и провел серию наблюдений на удалениях до 1500 км от источника на частотах от десятков до десятых долей Герца.

**В 2001 году** состоялась служебная командировка с делегацией ВМФ в Китай (Пекин, Ухань). На этот раз обсуждалась конкретная работа, связанная с источником «Зевс» и с организацией геодинимического прогнозного полигона на Тибете. Российская сторона бралась изготовить генератор мощностью 200 кВт и разработать методику наблюдений. Возглавлял делегацию Л.Б. Песин. В составе делегации были Г.С. Нероба, Б.К. Горбунов, В.С. Акулов. По итогам совещания требуемый генератор был изготовлен в НИИ ПТ и доставлен в Китай, но дальнейшая его судьба осталась в глубокой тайне.

**В период с 2000 по 2005 годы** инициативу в разработке КНЧ-тематики взял на себя Л.Б. Песин в рамках темы Ливадия и добился целого ряда существенных результатов, описанных в статье Ю.В. Фесенко в настоящем сборнике. Одним из наиболее важных достижений явилось создание макета аппаратурного комплекса КНЧ диапазона на основе генераторов «Энергия-1» и «Энергия-2» мощностью 100 и 200 кВт, соответственно. Генераторы созданы силами Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН при ведущем участии Геологического института КНЦ РАН. Основными разработчиками станций и средств их согласования с промышленными ЛЭП явились сотрудники ЦФТПЭС В.В. Колобов, М.Б. Баранник, П.И. Прокопчук, В.Н. Селиванов и зав. лаб. А.Н. Данилин. Разработка методики КНЧ радиосвязи осуществлялась с участием Геологического института КНЦ путем подключения на первых этапах генератора ЭРС-67 мощностью 29 кВт, а затем и означенных генераторов серии «Энергия» сначала к ЛЭП Л-401, а потом и к антенной системе источника «Зевс». Сигналы подавались по заданной программе во время проведения «ходовых» испытаний на морских и береговых объектах ВМФ. В этой работе нашим неперенным помощником был Юрий Дмитриевич Лисицын. Основную работу по монтажу и эксплуатации генераторной установки ЭРС-67 на ВЛ-401 выполнял Александр Дмитриевич Токарев при содействии Юрия Масумовича Невретдинова, Игоря Матвеевича Зархи и начальника п/с 200 Колэнерго Валерия Иосифовича Трофимчика. Не открою большого секрета, если сообщу, что во время каждого испытания мы выставляли измерительные станции в самых разных районах Кольско-Карельского региона, а частенько и за границей, и решали свои, земные задачи, связанные с решением фундаментальной проблемы физики земных недр и с изучением глубинного строения рудных районов. Таким образом и реализовывалась идея использования источника «Зевс» по двойному назначению.

**В 2007 и 2009 годах**, используя полученный опыт работы с источником «Зевс» и с промышленными ЛЭП мы, сотрудники Геологического института КНЦ РАН совместно с ЦФТПЭС осуществили два уникальных для мировой практики международных эксперимента FENICS-2007 и FENICS-2009 по глубинному электромагнитному зондированию литосферы Фенноскандинавского щита с использованием двух взаимно ортогональных ЛЭП Л-401 и Л-154. По своей сути я сравниваю эти эксперименты с экспериментом Майкельсона Морли по измерению скорости света в двух направлениях. Мы, используя две взаимно-ортогональные излучающие антенны, исследовали удельное электрическое сопротивление нижней части континентальной литосферы и показали, что оно не зависит от направления поляризации первичного поля, то есть является изотропным, горизонтально-однородным. Этот результат кардинально изменил наши представления о строении нижней части земной коры и литосферы в целом, поскольку диаметрально отличается от ранее полученных данных МТЗ, основанных на использовании естественных источников электромагнитного поля.

**2011 год.** В заключение краткого описания работ не могу не упомянуть полученный в 2011 году опыт использования СНЧ-источника «Зевс» при изучении глубинного строения газо-нефтеперспективных районов Западной Сибири. При содействии Полярного геофизического института КНЦ РАН в лице Валерия Федосеевича Григорьева нам выделили два сеанса работы источника «Зевс» на согласованной сетке частот. Мы уверенно зафиксировали сигналы на удалении 2100 км с превышением более 10-20 децибел над шумами. Это

позволило нам использовать поле источника «Зевс» для более точной в сравнении с АМТЗ оценки фазовых и амплитудных параметров высокочастотной области кривой частотного зондирования. В дальнейшем, при решении обратной задачи эти данные были использованы в процедуре Оккама для привязки фазовых диаграмм на низких частотах и определения положения нефтеперспективных горизонтов на глубинах до 2-3 км. Полученные данные хорошо совпали с результатами сверхглубокого бурения [Жамалетдинов и др., 2013].

В ходе минувшего полевого сезона, **в июне 2013 года**, благодаря оперативной поддержке Андрея Владимировича Молькова мы выполнили измерения сигналов «Зевса» на частотах 41, 62, 82, 144 и 188 Гц на участках Ковдор и Уполокша. В дальнейшем, на сентябрь планировалось провести измерения по схеме 2005 года, путем подключения нашего генератора «Энергия-2» к антенне «Зевс», но работа не состоялась по причине ремонтных работ.

Завершая воспоминания о почти четвертьвековой истории работ Геологического института КНЦ РАН и Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН с источником «Зевс», выражаю надежду на то, что усилия наши были потрачены не зря. Хочу надеяться, что со временем на объекте «Зевс» будет существовать дежурная гражданская генераторная установка «Энергия» мощностью 200 кВт, способная выполнять, по согласованию с Центром связи ВМФ, практически важные задачи изучения земных недр Карело-Кольского региона и способствовать наращиванию минерально-сырьевой базы северо-запада России.

#### Список литературы

1. Бернштейн С.Л., Барроуз М., Эванс Д.Э., Гриффитс Э.С., Макнейл Д.А., Ниссен Ч.У., Ричер А., Уайт Д.П., Уиллим Д.К. Дальняя связь на крайне низких частотах. // ТИИЭР, Proceedings IEEE, 1974. том 62, С. 5-30.
  2. 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.
  3. Велихов Е.П., Жамалетдинов А.А., Собчаков Л.А., Вешев А.В., Сараев А.К., Токарев А.Д., Шевцов А.Н., Васильев А.В., Сонников А.Г., Яковлев А.В. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ - диапазона. // Доклады Академии Наук. Т. 338, №1, С. 106-109, 1994.
  4. Жамалетдинов А.А., М.С. Петрищев, А.Н. Шевцов, В.В. Колобов, В.Н. Селиванов, М.Б. Баранник, Е.Д. Терещенко, В.Ф. Григорьев, П.А. Сергушин, Е.А. Копытенко М.А. Бируля, А.А. Скороходов, О.А. Есипко, Р.В. Дамаскин (2013). Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин ЯНАО в полях естественных и контролируемых источников. // Физика Земли, 2013, № 6 с. 99-115.
- 
-

## Глава 6. Фотогалерея



Фото 1. Члены государственной комиссии по приемке РПМ-2 второй очереди объекта «Зевс».

Слева направо: подполковник Маркин А.Н., старший инженер-испытатель майор Дорофеев Александр Борисович, зав. кафедрой радиотехники Ленинградского политехнического института Цикин И.А., начальник 180 полигона ВМФ контр-адмирал Меркулов И. И., главный конструктор КТС «Вариация» Удальев Ю.Э., начальник РПМ-2 объекта «Зевс» Филипченко, начальник Североморского филиала 180 полигона ВМФ кап. 1 ранга Стадниченко Г.П., старший инженер-испытатель кап. 1 ранга Юнош Анатолий Николаевич, начальник отдела 180 полигона ВМФ Горбунов Б.К. (Из архива Ю.М. Кононова)



Фото 2. Административный корпус объекта «Зевс»



Фото 3. Посещение начальником связи ВМФ законченного строительства первой очереди объекта «Зевс».

Слева направо: Мохначев А.П., Сонников А.Г., Пониматкин В.Е., Удадьев Ю.Э., Крылов М.М., ???, Горбунов Б.К., Песин Л.Б., Меркулов И.И., Панфилов А.С., Стадниченко Г.П. (Из архива Ю.Д. Лисицына).



Фото 4. Чествование ветеранов объекта «Зевс», 2007 год

Слева направо: Швыдченко Ю.Л., Балуттов С.И., Подогов Е.Г., Ткаченко А.Ф. Сажин Е.Г., Кузнецов В.Н., Маркин А.Н., Козин А.О., Сидорчук В.С., Быков А.Н., Пухальский В.С., Ничипорук Р.И., Шетинин Ю.Н. (Из архива А.В. Молькова).



Фото 5. Командир объекта “Зевс” с 1992 по 1998 год капитан 1 ранга Кадышевич Геннадий Михайлович



Фото 6. Командир объекта “Зевс” с 1998 года по настоящее время капитан 1 ранга Мольков Андрей Владимирович



Фото 7. Пульт управления объектом «Зевс»



Фото 8. Творческий коллектив КНЦ РАН (г. Апатиты) у макета генератора Энергия-1 мощностью 100 кВт, изготовленного по заказу Л.Б. Песина для исследований в КНЧ-СНЧ диапазоне ( ).

Слева направо: Колобов В.В., Прокочук П.И., Жамалетдинов А.А., Баранник М.Б. (Из архива А.А. Жамалетдинова).



Фото 9. Конкудеро-Мамаканское нагорье, Иркутская область, 1987 год. Совместная группа БИЕН и НИИ ЗК СПбГУ после высадки в пункте, намеченном для измерения сигналов СНЧ-объекта «Зевс».

Слева направо: С.Бальхаев, В.Бондаренко, А.Лебедев, А.Яковлев (сидит), М.Голубев, В.Хаптанов, Ю.Башкуев, К.Сагалуев. (из архива Ю.Б. Башкуева)





Фото 10. Рассмотрение результатов геофизических исследований КНЦ РАН с использованием сигналов объекта “Зевс”.

Слева направо: начальник связи ВМФ Кононов Ю.М., начальник института связи Директоров Н.Ф. начальник связи Северного флота Голин Б.Н. (из архива Ю.Д. Лисицына)



Фото 11. Комиссия ГШ ВМФ СССР в аэропорту поселка Таксимо.

Слева направо: научный сотрудник БИЕН Ю.А. Ивойлов, В.И. Агапонов, В.Е.Пониматкин, И.А.Скоков. Байкало-Амурская магистраль, октябрь 1983 года. (Из архива Ю.Б. Башкуева).



Фото 12. Леонид Авраамович  
Собчаков

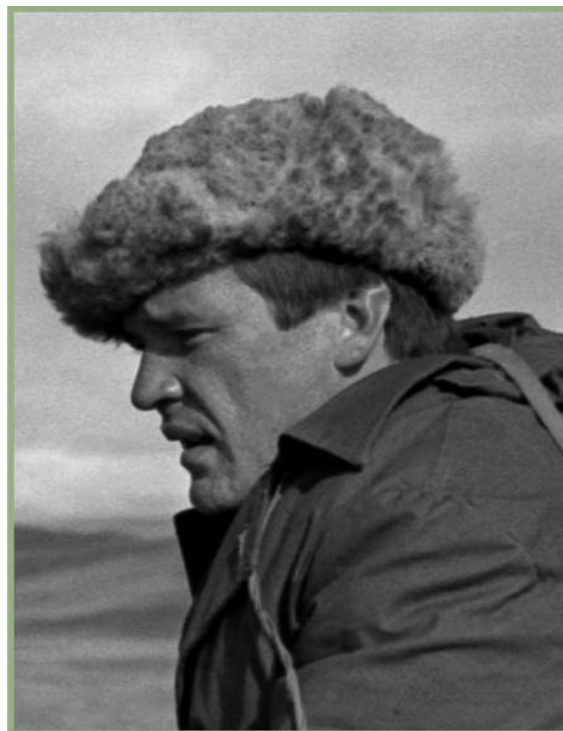


Фото 13. Александр Васильевич  
Яковлев



Фото 14. Участники обсуждения программы работ по созданию  
мобильного генераторного КНЧ-СНЧ комплекса.

Слева направо: Лев Борисович Песин, Виктор Владимирович Нелидов, Юрий Владимирович Фесенко, Юрий Дмитриевич Лисицын.



Фото 15. Китайская делегация в Санкт-Петербурге на церемонии передачи СНЧ-КНЧ генератора мощностью 200 кВт, изготовленного в НИИ ПТ под руководством Л.Б. Песина. Слева направо российские представители: 2-й А.К. Сараев, 7-й А.С. Панфилов, 10-й В.С. Акулов, 11-й Л.Б. Песин, 12-й Ю.Д. Лисицын, (2004 год). и



Фото 16. Атомная субмарина в северных водах.

Список авторов статей в сборнике «Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой»

№ п/п	Ф. И.О	Стр.	№ п/п	Ф. И.О.	Стр.
1.	Астахова Н.Л.	158	35.	Мольков А.В.	177
2.	Баранник М.Б.,	161	36.	Морозова О.М.	20
3.	Башкуев Ю.Б.	187	37.	Никифоров А.Б.	93
4.	Беляев П.П.	149	38.	Парфентьев П.А.	92, 102
5.	Блинова Алина	167	39.	Пертель М.И.	40, 66, 67, 74, 92, 93, 94, 102, 114, 121
6.	Ваньян Л.Л.	40,	40.	Песин Л.Б.	66, 92, 121
7.	Васильев А.В.	63, 66, 92, 158	41.	Петрищев М.С.	88
8.	Велихов Е.П.	63, 121	42.	Поляков С.В.	44, 77, 149
9.	Вешев А.В.	63	43.	Понятова А.	178
10.	Владимиров Д.Н.	158, 149	44.	Прокофьев В.Е.	92, 102
11.	Волосевич В.С.	149	45.	Протопопов Л.Н.	149
12.	Головенко В.Б.	158	46.	Ратников К.Д.	149
13.	Гордюшкин С.М.	149	47.	Редько Г.В.	149
14.	Гохберг М.Б.	67	48.	Савицкий А.П.	149
15.	Григорьев В.Ф.	88	49.	Сараев А.К.	19, 20, 34, 44, 63, 66, 67, 74, 92, 93, 94, 102, 114, 138, 158
16.	Денисов Р.В.,	158	50.	Селиванов В.Н.	88,
17.	Елисеев А.А.	149	51.	Собчаков Л.А.	44, 63, 66, 78, 92, 149
18.	Ермакова Е.Н.	78, 149	52.	Сонников А.Г.	63
19.	Есипко О.А.	88,	53.	Токарев А.Д.	40, 63, 109, 121
20.	Жамалетдинов А.А.	11, 40, 63, 66, 88, 109, 121, 161, 165, 167, 171, 190	54.	Тронд Якобсен	179
21.	Ивочкин В.Г.	19, 34, 138	55.	Федоров А.Б.	149
22.	Исаев С.В.	149	56.	Харламов М.М.	74, 92, 102
23.	Кадышев Г.М.	93, 121	57.	Шевцов А.Н.	15, 40, 52, 63, 88, 109, 121
24.	Колобов В.В.	88, 161	58.	Шлыков А.А.	158
25.	Комлева Е.В.	187	59.	Яковлев А.В.	63
26.	Кононов Ю.М.	40, 121, 168, 171	60.	Якунин М.Н.	149
27.	Копытенко Е.А.	88,	61.	Bannister Peter R.	144
28.	Косткин П.М.	19, 20, 44, 74	62.	Bosinger T.	78
29.	Котик Д.С.	78	63.	Deng Qianhui	74
30.	Кочеров А.Б.	19, 74, 93	64.	Fraser-Smith Antony C.	144
31.	Ларионов К.А.,	158	65.	Tang Ji	74
32.	Лисицын Ю.Д.	186	66.	Wang Jijun	74
33.	Малкин З.М.	94, 114	67.	Zgao Guoze	74
34.	Митрофанов Ф.П.	109	68.	Zhao Junmeng.	74

Список участников работ с СНЧ-источником «Зевс», упомянутых в главе 5 и в разделе «Фотогалерея».

№ п/п	Ф.И.О	Стр.
1.	Агапонов В.И.	188, 189, 200
2.	Акиндинов В.В.	188, 190
3.	Акулов В.С.	176, 186, 193, 194
4.	Алексанян	186
5.	Алексеев Е.	188, 189
6.	Арманд Н.А.	188
7.	Асминг В.Э.	191
8.	Балутов С.И.	197
9.	Бальхаев С.	199
10.	Баных М.В.	176
11.	Баранник М.Б.	194, 199
12.	Батуев Б-Ш.Ч.	189
13.	Башкуев Ю.Б.	189, 191, 199, 200
14.	Безродный В.	187
15.	Бернстайн С.П.	190
16.	Беспалов	186
17.	Блиох П.	188
18.	Болтунов Н.И.	186
19.	Бондаренко В.	199
20.	Бормотов В.	187
21.	Быков А.Н.	197
22.	Бычков М.А.	176
23.	Ваньян Л.Л.	192
24.	Васильев А.Н.	192
25.	Велихов Е.П.	165, 190, 192
26.	Вешев А.В.	165, 188, 189, 191
27.	Виноградов Ю.А.	191
28.	Воронин А.И.	176
29.	Воронин С.	192
30.	Гетманцев Г.Г.	178
31.	Голин Б.Н.	200
32.	Голубев М.	191, 199
33.	Горбунов Б.К.	176, 186, 193, 194, 196, 197
34.	Григорьев В.Ф.	194
35.	Гугин А.	188
36.	Гуревич М.В.	191
37.	Данилин А.Н.	194
38.	Директоров Н.Ф.	200
39.	Дмитриков В.Ф.	186
40.	Дорофеев Ю.П.	196

№ п/п	Ф.И.О	Стр.
41.	Евдокимов Ю.А.	191
42.	Егоров В.	192
43.	Еремин С.	188
44.	Ерофеев А.	189
45.	Жамалетдинов А.А.	167, 170, 176, 177, 187, 199
46.	Жеребцов Г.А.	190
47.	Жилинков В.И.	176
48.	Зайцев Г.В.	188
49.	Зархи И.М.	1906 194
50.	Зугравеску	194
51.	Ивойлов Ю.А.	200
52.	Ивочкин В.Г.	188, 189
53.	Ильмер Д.В.	176
54.	Кадышевич Г.М.	191, 198
55.	Каменский А.А.	192
56.	Клэнси Том	181
57.	Козин А.О.	197
58.	Колобов В.В.	194, 199
59.	Кононов Ю.М.	167, 169, 192, 196, 200
60.	Корья Тойво	193
61.	Котельников В.А.	174
62.	Кравченко В.А	175
63.	Крылов М.М.	197
64.	Кузнецов В.Н.	197
65.	Куроедов В.И.	176
66.	Лавёров Н.П.	193
67.	Лебедев А.	199
68.	Лисицын Ю.Д.	176, 194, 197, 200, 201
69.	Любан В.Г.	177
70.	Макаров Г.И.	188
71.	Маркин А.Н.	196, 197
72.	Маркко Эрне	193
73.	Мелуа А.И.	175
74.	Меркулов И.И.	189, 196, 197
75.	Михайлов В.И.	186
76.	Мольков А.В.	176, 195, 197, 198
77.	Мохначев А.П.	197
78.	Мохосоев М.В.	188, 189
79.	Невретдинов Ю.М.	194
80.	Нелидов В.В.	201

№ п/п	Ф.И.О	Стр.
81.	Нероба Г.С.	193, 194
82.	Николаенко А.	188
83.	Ничипорук Р.И.	197
84.	Носков С.А.	192
85.	Оношко В.	187
86.	Очкур Н.В.	191
87.	Павлов П.П.	186
88.	Пальшин Н.	192
89.	Панфилов А.С.	176, 186, 188, 197
90.	Парфентьев П.	188, 190
91.	Пертель М.И.	167, 188
92.	Песин Л.Б.	174, 175, 176, 177, 188, 190, 191, 193, 194, 197, 199, 201
93.	Подберезкин Ю.Т.	191
94.	Подочев Е.Г.	197
95.	Поляков С.В.	194
96.	Пониматкин В.Е.	188, 189, 197, 200
97.	Потапова Л.	188
98.	Потехин А.П.	190
99.	Прокопчук П.И.	194, 199
100.	Пухальский В.С.	197
101.	Пылаев А.А.	189
102.	Пятненко А.Е.	176
103.	Романов В.	193
104.	Ромеро Ренато	182
105.	Рязанцев А.М.	188, 190
106.	Сагалуев К.	199
107.	Сажин Е.Г.	197
108.	Сараев А.К.	193, 194
109.	Селиванов В.Н.	194
110.	Сидоренко Л.Г.	176
111.	Сидорчук В.С.	197
112.	Скоков И.А.	188, 189, 200
113.	Случинский Д.В.	176
114.	Смоляков А.А.	176
115.	Собчаков Л.А.	167, 188, 189, 190, 191, 193, 194, 201
116.	Сонников А.Г.	197
117.	Стадниченко Г.П.	196, 197
118.	Станика Димитру	194
119.	Терещенко Е.	187

№ п/п	Ф.И.О	Стр.
120.	Тетекин Н.	188
121.	Тихомиров Н.П.	189
122.	Ткаченко А.Ф.	197
123.	Токарев А.Д.	191, 192, 194
124.	Томилев В.А.	176
125.	Трофимчик В.И.	194
126.	Удальев Ю.Э.	188, 189, 196, 197
127.	Фесенко Ю.В.	194, 201
128.	Филиппов Ю.	188
129.	Филипченко	196
130.	Фрейман И.Г.	186
131.	Хаптанов В.Б.	189, 199
132.	Худолеев В.Е.	176
133.	Цикин И.А.	196
134.	Цыдыпов Ч.Ц.	188
135.	Чуев Ю.В.	188
136.	Швыдченко Ю.Л.	197
137.	Шевцов А.Н.	191, 192
138.	Шетинин Ю.Н.	197
140.	Юнош А.Н.	196
141.	Яковлев А.	199
142.	Яковлев А.В.	165, 188, 189, 190, 191, 201
143.	Ямпольский А.Г.	191
144.	Falkenburg Brigitte	187

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
КОНТРОЛИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ СНЧ ДИАПАЗОНА  
С ИОНОСФЕРОЙ И ЗЕМНОЙ КОРОЙ

Том 1

Материалы Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара

Научное некоммерческое издание выпущено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований, грант офи-м 13-05-12044



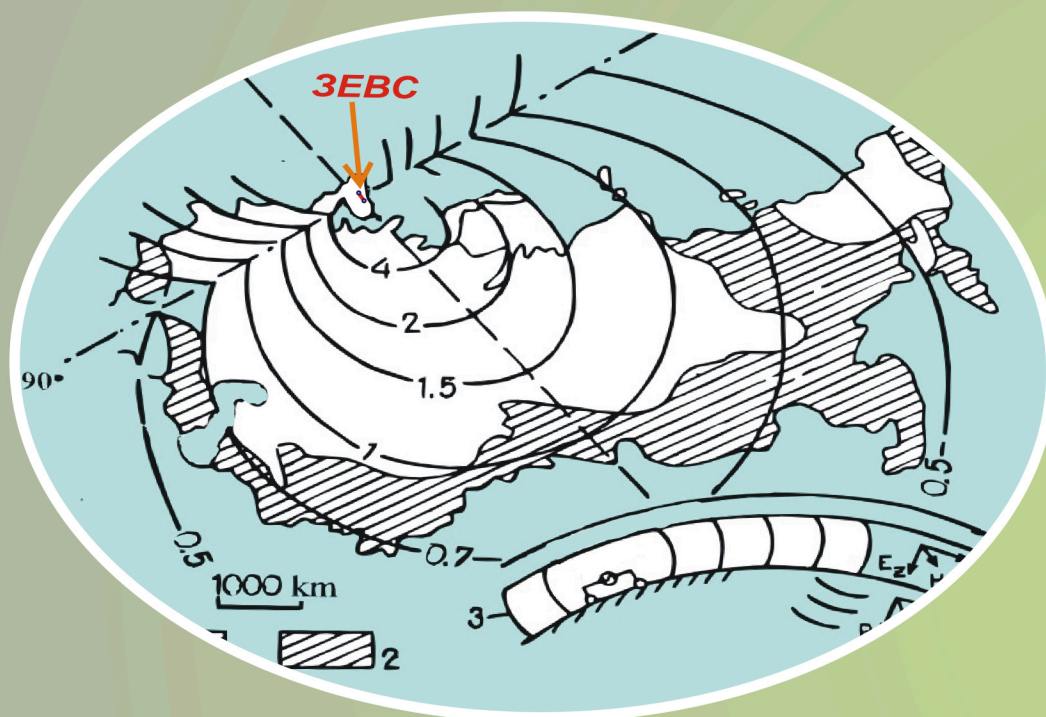
---

Отпечатано в ООО К & М

184209 г. Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, д. 17 а  
тел. / факс (881555) 77329

---

Тираж 100 экз.



“С самого начала своего существования  
 “Зевсу” было предписано стать  
 станцией двойного назначения”.  
 /А.В. Мольков, 2013/