

ВОПРОСЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 2 (10)

2 0 1 6

Редакционная коллегия

А. П. Хоменко – главный редактор, д. т. н., профессор, ректор ИрГУПС, Иркутск;
А. И. Илларионов – зам. главного редактора, д. ф.-м. н., профессор, ИрГУПС, Иркутск;
Ю. Я. Харитонов – д. х. н., профессор, Первый МГМУ им. И. М. Сеченова, Москва;
С. А. Ишанов – д. ф.-м. н., доцент, БФУ им. И. Канта, Калининград;
В. М. Григорьев – д. ф.-м. н., член-корр. РАН, ИСЗФ СО РАН, Иркутск;
Е. А. Илларионова – д. х. н., профессор, ИГМУ, Иркутск;
М. Р. Бакланов – д. х. н., Международный центр микроэлектроники, Лювен, Бельгия;
Н. М. Буднев – д. ф.-м. н., с. н. с., ИГУ, Иркутск;
Г. Я. Смольков – д. т. н., профессор, ИСЗФ СО РАН, Иркутск;
В. И. Белоконь – д. ф.-м. н., профессор, ДВФУ, Владивосток;
Т. А. Степанова – д. фарм. н., профессор, ДВГМУ, Хабаровск;
О. А. Букин – д. ф.-м. н., профессор, МГУ им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток;
В. Ф. Лосев – д. ф.-м. н., профессор, ИСЭ СО РАН, Томск;
Л. Д. Михеев – к. ф.-м. н., ФИАН, Москва;
Б. П. Адуев – д. ф.-м. н., профессор, ИУХМ, Кемерово;
Б. И. Кидяров – д. ф.-м. н., с. н. с., ИФП им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск;
В. М. Лисицын – д. ф.-м. н., профессор, НИТПУ, Томск;
Е. Ф. Мартынович – д. ф.-м. н., профессор, ИЛФ СО РАН, Иркутск;
О. В. Кузьмин – д. ф.-м. н., профессор, ИМЭИ ИГУ, Иркутск;
Е. М. Лыткина – ответственный секретарь, к. т. н., доцент ИрГУПС, Иркутск

Редакционный совет

Н. А. Корчевин – д. х. н., профессор, ИрГУПС, Иркутск;
М. А. Никитин – д. ф.-м. н., профессор, БФУ им. И. Канта, Калининград;
В. В. Демьянов – д. т. н., доцент, ИрГУПС, Иркутск;
Г. В. Попов – д. ф.-м. н., профессор, ИрГУПС, Иркутск;
И. П. Сыроватский – к. фарм. н., доцент, ИГМУ, Иркутск;
Т. А. Асеева – д. фарм. н., профессор, ИОЭБ СО РАН, Улан-Удэ;
Г. Г. Николаева – д. фарм. н., профессор, ИОЭБ СО РАН, Улан-Удэ;
А. П. Кузьменко – д. ф.-м. н., профессор, ЮЗГУ, Курск;
В. И. Барышников – д. ф.-м. н., профессор, ИрГУПС, Иркутск;
Ю. А. Давыденко – к. т. н., ИЗК СО РАН, Иркутск;
А. Е. Будяк – к. г.-м. н., Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск;
А. В. Паршин – к. г.-м. н., Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск;
С. Ю. Мешалкина – к. фарм. н., доцент, ДВГМУ, Хабаровск;
Т. М. Янчук – к. б. н., доцент, ИГУ, Иркутск;
Н. Т. Афанасьев – д. ф.-м. н., профессор, ИГУ, Иркутск;
В. В. Криштоп – д. ф.-м. н., профессор, ДВГУПС, Хабаровск;
О. Г. Струсовская – д. фарм. н., СГМУ, Архангельск;
В. Ю. Яковлев – д. ф.-м. н., профессор, НИТПУ, Томск;
В. И. Иванов – д. ф.-м. н., профессор, ДВГУПС, Хабаровск

Ответственный за выпуск Е. М. Лыткина

Дизайн обложки: В. В. Гасельник

Макет издания и компьютерная верстка: Е. М. Лыткина, Н. Е. Кильдишева

Уважаемые читатели!

Наш журнал публикует статьи по следующим направлениям.

Отрасли науки:

01.00.00 – «Физико-математические науки», из них группы специальностей 01.01.00 – «Математика», 01.04.00 – «Физика», 01.03.00 – «Астрономия»;

14.00.00 – «Медицинские науки», из них группа специальностей 14.04.00 – «Фармацевтические науки»;

25.00.00 – «Науки о земле».

Редакция приглашает вас к участию в последующих номерах издания в качестве авторов, рекламодателей и читателей. К публикации в журнале принимаются статьи ученых, аспирантов и студентов, занимающихся научно-исследовательской деятельностью.

Электронный вариант журнала можно найти на сайте Иркутского государственного университета путей сообщения <http://irgups.ru>, а также в ЭБС издательства «Лань» по адресу <http://e.lanbook.com>. Аннотации статей на двух языках можно найти на сайте РИНЦ <http://elibrary.ru>.

Адрес редакции: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

E-mail: v.estestvozn@gmail.com

Журнал издается с 2013 г.

Периодичность – 4 раза в год.

Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщения

СОДЕРЖАНИЕ

ДЛЯ АВТОРОВ	6
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ	
<i>Даваадорж Б., Краковский Ю. М.</i> Численные алгоритмы вычисления показателей надежности рельсовых скреплений	9
<i>Иванов В. И., Перков Ю. О.</i> Фотоприемник излучения на основе фотогальванического и пироэлектрического эффектов	15
ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ	
<i>Штарев Д. С., Штарева А. В., Зайцев А. В.</i> Исследование токсического воздействия продуктов фотостимулированного разложения фенола при использовании катализатора висмутат кальция – оксид висмута	23
НАУКИ О ЗЕМЛЕ	
<i>Ингеров И. А., Рудак Т. В., Ермолин Е. Ю.</i> Многофункциональная 4–8-канальная электроразведочная аппаратура поколения 5+	31
<i>Ингтем Ж. Г., Дмитриев В. И.</i> Использование методов численного дифференцирования для обработки геофизических данных электромагнитных зондирований с целью повышения разрешающей способности	36
<i>Коротаев С. М., Буднев Н. М., Сердюк В. О., Киктенко Е. О., Горохов Ю. В.</i> Глубоководный электромагнитный мониторинг в Байкале – классический и неклассический аспекты	41
<i>Мороз Ю. Ф., Смирнов С. Э.</i> Особенности поведения вековых вариаций вертикальной составляющей геомагнитного поля по данным магнитных обсерваторий: Паратунка, Какиоки и Иркутск	53
<i>Никифоров В. М., Шкабарня Г. Н., Пальшин Н. А., Варенцов И. М., Епишкин Д. В., Каплун В. Б.</i> Новые глубинные МТ-зондирования в Приморье и Приамурье	57
<i>Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Вагин Д. В., Кошкина Ю. И., Трубачева О. С.</i> О новом подходе к геометрической 3D-инверсии данных электроразведки с восстановлением параметров сопротивления и поляризуемости во временной области в проводящих средах	62
<i>Голубцова Н. С., Израиль М., Пушкарев П. Ю., Смирнов М. Ю., Соколова Е. Ю.</i> Первый опыт трёхмерной интерпретации магнитотеллурических данных, полученных в Гарвальских Гималаях	67
<i>Голубцова Н. С., Вагин С. А., Варданянц И. Л., Ковтун А. А., Куликов В. А., Ковачикова С., Лозовский И. Н., Пушкарев П. Ю., Смирнов М. Ю., Соколова Е. Ю., Таран Я. В., Успенский Н. И., Шустов Н. Л., Яковлев А. Г.</i> Новые магнитотеллурические зондирования на профиле «Выборг – Суоярви» через Ладожскую аномалию электропроводности	72
<i>Светов Б. С.</i> Самосогласованные задачи геофизики	76
<i>Спичак В. В., Гойдина А. Г.</i> Метод восстановления сейсмических скоростей по удельному сопротивлению пород	81

<i>Спичак В. В., Безрук И. А., Гойдина А. Г., Захарченко М. В.</i> Метод построения трехмерных геоэлектрических моделей на основе комбинированной инверсии профильных тензорных и площадных скалярных магнитотеллурических данных	86
<i>Спичак В. В., Гойдина А. Г., Захарченко М. В.</i> Трехмерная геолого-геофизическая модель Сорского медно-молибденового комплекса по электромагнитным и другим геофизическим данным	92
<i>Барсуков П. О., Файнберг Э. Б.</i> Электромагнитные зондирования плато Гиза (Египет)	97
АВТОРСКИЙ ДОГОВОР	103
АНКЕТА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА.....	104
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ	105

ДЛЯ АВТОРОВ

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к оформлению статей, принимаемых к публикации

1. Рукопись статьи представляется в редакцию журнала в электронном виде по адресу v.estestvozn@gmail.com и распечатанной в двух экземплярах с подписью авторов на последней странице по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения, кафедра «Математика», каб. Г308.

2. К статье необходимо приложить анкету авторов, отзыв, авторский договор и экспертное заключение (2 экз.) о возможности опубликования статьи в открытой печати. В связи с новыми требованиями ВАК размер аннотации должен быть не менее 180 символов и не более 320.

3. Не допускается направление в редакцию статей, уже публиковавшихся или посланных на публикацию в другие журналы.

4. Автор принимает на себя обязательства в том, что текст статьи является окончательным вариантом, содержит достоверные сведения, касающиеся результатов исследования, и не требует доработок.

5. Рецензирование статей осуществляется редколлегией журнала с привлечением ведущих специалистов в соответствующей области знаний. Решение об опубликовании принимается редакцией на основании рецензий.

6. В случае отклонения статьи редакция направляет автору мотивированный отказ в публикации.

7. Не принятые к опубликованию рукописи не возвращаются.

8. Статьи публикуются бесплатно. Выплата авторских гонораров не предусматривается.

9. Рекомендуемый объем – до 8 страниц. Статьи объемом более 8 страниц могут быть приняты к печати только с разрешения главного редактора.

10. **Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением *.doc** – документа, созданного средствами Microsoft Word 97–2003, и распечатки на стандартных листах формата А4 (210×297 мм), заверенной подписями авторов.

11. **Первая страница** рукописи кроме текста должна содержать индекс статьи по УДК (проставляется в левом верхнем углу первого листа), фамилии и инициалы авторов, название статьи. Над фамилиями ставится номер ссылки, по которой после ключевых слов и до основного текста статьи указываются ученая степень, ученое звание, должность, место работы каждого автора и e-mail. Если работа выполнена при финансовой поддержке какого-либо гранта, то ссылка на него дается в виде маркируемой символом * сноски к названию статьи. Аннотация и ключевые слова на русском языке оформляются по образцу. Инициалы и фамилии авторов, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке размещаются после текста статьи.

Статьи, оформленные с нарушением настоящих требований, к рассмотрению не принимаются.

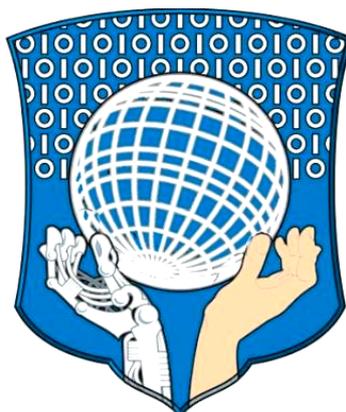
По вопросам публикации статей обращаться:

664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Математика», каб. Г308,
Лыткиной Елене Михайловне.

Телефон: **(8-3952) 63-83-10 (доп. 0-263).**
E-mail: v.estestvozn@gmail.com.

Форму авторского договора и пример оформления статьи можно посмотреть в конце журнала.

ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ



Математика
Физика
Астрономия
Фармацевтические науки
Науки о Земле



УДК 519.6:311

Б. Даваадорж ^{^1}, Ю. М. Краковский ^{^2}

ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

Аннотация. Предложены численные алгоритмы оценки показателей надежности рельсовых скреплений, рассматриваемых как невозстанавливаемые с точки зрения надежности объекты. Показателями надежности являются: вероятность безотказной работы, интенсивность отказа, вероятность безотказной работы для остаточного ресурса, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс, средний остаточный ресурс до отказа, гамма-процентный остаточный ресурс. С учетом литературных рекомендаций в качестве вероятностной модели наработки до отказа рельсового скрепления рекомендовано треугольное распределение, которое описывается наибольшим и наиболее вероятным значениями. С использованием этого распределения проведена апробация полученных численных алгоритмов оценки показателей надежности рельсовых скреплений. Результаты апробации подтвердили высокую точность предложенных численных алгоритмов.

Ключевые слова: наработка до отказа, показатели надежности, рельсовые скрепления, компьютерное моделирование.

Об авторах:

^{^1} Сотрудник Улан-Баторской железной дороги, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: dbbaatar@yahoo.com.

^{^2} Д. т. н., профессор, кафедра информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, e-mail: kum@stranzit.ru.

B. Davaadorch, Y. M. Krakovskiy

NUMERICAL ALGORITHMS FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF RELIABILITY OF RAIL FASTENINGS

Abstract. The numerical algorithms for evaluation of parameters of reliability of rail fastenings, considered as unrecoverable objects in terms of reliability, were proposed. The indicators of reliability are survival probability, failure rate, survival probability for the residual life, the average time to failure, gamma-percentile life, the average residual life to failure, and the gamma-percentile residual resource. Using literary recommendations, the triangular distribution, which is described by the largest and the most probable values was recommended as a probabilistic model of operating time to failure of rail fastening. Using this distribution, testing of numerical algorithms for evaluation of parameters of reliability of rail fastenings was conducted. The results of testing confirmed the high accuracy of the proposed numerical algorithms.

Keywords: operating time to failure, parameters of reliability, rail fastening, computer modeling.

Введение

В работе [1] для рельсовых скреплений типа APC при определении закона распределения вероятностей для наработки до отказа обоснован подход с привлечением экспертов. Эксперты, имея некоторую статистическую информацию, оценивают для наработки наибольшее значение (t_m) и наиболее вероятное значение (t_o). Эти два параметра позволяют описать треугольное распределение с плотностью распределения вероятностей

$$f(t) = \begin{cases} \frac{2 \cdot t}{t_m \cdot t_0}, & 0 < t \leq t_0 \\ \frac{2(t_m - t)}{t_m \cdot (t_m - t_0)}, & t_0 < t < t_m \end{cases} . \quad (1)$$

Важность исследования рельсовых скреплений, а также прогнозирования и анализа перевозочного процесса на Улан-Баторской железной дороге отмечается в различных работах, например [2, 3, 4, 5].

В работе [1] для треугольного распределения найдены рекомендованные для невозстанавливаемого объекта показатели надежности: вероятность безотказной работы, интенсивность отказа, вероятность безотказной работы для остаточного ресурса, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс, средний остаточный ресурс до отказа, гамма-процентный остаточный ресурс. В цитируемой работе для распределения (1) получен алгоритм моделирования времени наработки

$$t = \begin{cases} \sqrt{t_m \cdot t_0 \cdot r}, & 0 < r \leq \frac{t_0}{t_m}; \quad 0 < t \leq t_0 \\ t_m - \sqrt{t_m(t_m - t_0)(1-r)}, & \frac{t_0}{t_m} < r < 1; \quad t_0 < t < t_m \end{cases} . \quad (2)$$

Здесь r – значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале $(0, 1)$. Алгоритм (2) предлагается использовать для создания выборочных значений наработки до отказа объемом n .

В дальнейшем нам понадобятся следующие модели для треугольного распределения [1]:

1) вероятность безотказной работы

$$P(t) = \begin{cases} 1, & t \leq 0 \\ 1 - \frac{t^2}{t_m \cdot t_0}, & 0 < t \leq t_0 \\ \frac{(t_m - t)^2}{t_m \cdot (t_m - t_0)}, & t_0 < t < t_m \\ 0, & t \geq t_m \end{cases} ; \quad (3)$$

2) остаточный ресурс до отказа

$$Y = T - x, \quad (4)$$

где x – время, до которого объект не отказал, T – наработка до отказа;

3) вероятность безотказной работы остаточного ресурса (4):

3.1) $0 < x \leq t_0$,

$$P_x(y) = \begin{cases} 1, & y \leq 0 \\ \frac{t_m \cdot t_0 - (x+y)^2}{t_m \cdot t_0 - x^2}, & 0 < y \leq t_0 - x \\ \frac{t_0 \cdot (t_m - x - y)^2}{(t_m - t_0)(t_m \cdot t_0 - x^2)}, & t_0 - x < y \leq t_m - x \\ 0, & t > t_m - x \end{cases} ; \quad (5)$$

3.2) $t_0 < x < t_m$,

$$P_x(y) = \begin{cases} 1, & y \leq 0 \\ \frac{(t_m - x - y)^2}{(t_m - x)^2}, & 0 < y \leq t_m - x \\ 0, & t > t_m - x \end{cases} \quad (6)$$

В работах [6, 7, 8, 9] предложен численный подход, основанный на результатах компьютерного моделирования, позволяющий вычислять показатели надежности восстанавливаемых объектов. Целью данной работы является применение этого подхода для рельсового скрепления, наработка до отказа которого описывается треугольным распределением (1).

Алгоритмическое описание задачи

Сгруппируем полученную по алгоритму (2) выборку, J – число интервалов; длина интервала и узлы равны

$$\Delta t = b/J; \quad t_j = j \cdot \Delta t, \quad j = \overline{1, J}, \quad t_0 = 0; \quad t_J = b. \quad (7)$$

Введем следующие обозначения: n_j – частоты или число выборочных значений наработок, попавших в интервал (t_{j-1}, t_j) , их сумма $\sum_{j=1}^J n_j = n$, n – объем выборки;

$m_j = \sum_{i=1}^j n_i / n$ – накопленные относительные частоты, последнее значение $m_J = 1$.

Обратная величина относительных частот равна

$$k_j = 1 - m_j; \quad j = 1, \dots, J, \quad k_0 = 1. \quad (8)$$

При создании численной вероятности безотказной работы используется аппроксимация отрезками прямых, которые соединяют точки с координатами (t_j, k_j) . В результате получим [8]

$$P_r(t) = \begin{cases} 0, & t \geq t_m \\ k_{j-1} + (t - t_{j-1})(k_j - k_{j-1}) \frac{J}{t_m}, & 0 \leq t < t_m, \\ 1, & t < 0 \end{cases} \quad (9)$$

где $t_{j-1} \leq t < t_j, \quad j = \overline{1, J}$.

Используя модель (9) и рекомендации работы [8], найдем требуемые показатели надежности:

а) численная средняя наработка до отказа

$$\bar{t}_r = \int_0^{t_m} P_r(t) dt = \frac{t_m}{J} (0,5 + \sum_{j=1}^J k_j); \quad (10)$$

б) численный гамма-процентный ресурс до отказа для вероятности γ

$$t_r(\gamma) = t_{j-1} + \frac{(\gamma - k_{j-1}) \cdot t_m}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{1}{J}, \quad (11)$$

где $k_{j-1} \geq \gamma > k_j, \quad j = \overline{1, J}$.

Тогда численная вероятность безотказной работы для остаточного ресурса с учетом (4) равна [8]

$$P_x^r(y) = \begin{cases} 0, & y \geq t_m - x \\ p_j(i-1) + \frac{(y-t_{i-1})(p_j(i)-p_j(i-1)) \cdot J}{t_m}, & \\ 1, & y < 0 \end{cases} \quad (12)$$

где $x = j \cdot t_m / J$; $t_{i-1} \leq y < t_i$, $t_i = i \cdot t_m / J$, $i = \overline{1, J-j}$.

Используя модель (12) и рекомендации работы [8], найдем следующие показатели надежности:

а) численный средний остаточный ресурс до отказа

$$\tilde{y}_x = \frac{t_m}{J} \left[0,5 + \sum_{i=1}^{J-j} p_j(i) \right]; \quad (13)$$

б) численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа

$$\tilde{y}_j(\gamma) = t_{i-1} + \frac{(\gamma - p_j(i-1)) \cdot t_m}{p_j(i) - p_j(i-1)} \cdot \frac{1}{J}, \quad (14)$$

где $p_j(i-1) \geq \gamma > p_j(i)$, $i = \overline{1, J-j}$, $p_j(0) = 1$.

В цитируемых работах [6, 7, 8, 9] речь шла о восстанавливаемых объектах. В данном исследовании речь идет о невосстанавливаемых объектах. В этом случае важное значение имеет интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (15)$$

Здесь $f(t)$ – плотность распределения вероятностей, которая для треугольного распределения имеет вид (1); $P(t)$ – вероятность безотказной работы, которая для треугольного распределения имеет вид (3).

Интенсивность отказов (15) с учетом (1) и (3) равна

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{2 \cdot t}{t_m \cdot t_0 - t^2}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{2}{t_m - t}, & t_0 < t < t_m \end{cases}. \quad (16)$$

При значениях t , близких к t_m , интенсивность отказов (16) стремится к бесконечности.

Найдем численную интенсивность отказов по результатам имитационного моделирования. Для этого найдем ее значения в узлах

$$\omega_j = \frac{n_j}{n \cdot \Delta t \cdot k_j} = \frac{k_{j-1} - k_j}{\Delta t \cdot k_j}, \quad j = 1, \dots, J-1; \quad \omega_0 = 0. \quad (17)$$

Узлы (17) получаются исходя из формулы интенсивности отказов (15). Численную интенсивность отказов получим как совокупность отрезков прямых, соединяющих точки (t_j, ω_j) . Тогда с учетом (7), (8) и (16)

$$\lambda_r(t) = \omega_{j-1} + (t - t_{j-1})(\omega_j - \omega_{j-1})J/t_m, \quad 0 < t < t_m, \quad (18)$$

где $t_{j-1} \leq t < t_j$, $j = 1, \dots, J-1$.

Апробация полученных численных алгоритмов

Учитывая рекомендации работ [1, 2], в качестве исходных данных для апробации полученных численных алгоритмов примем следующие значения параметров треуголь-

ного распределения, описывающего наработку до отказа рельсового скрепления типа АРС:

$$t_m = 11, t_o = 4. \quad (19)$$

Для исходных данных (19) математическое ожидание наработки до отказа равно 5. На рис. 1 приведены вероятности безотказной работы (ВБР): 1 – ВБР для аналитической модели (3); 2 – ВБР для численной модели (9). Графическое представление моделей хорошо совпадает.

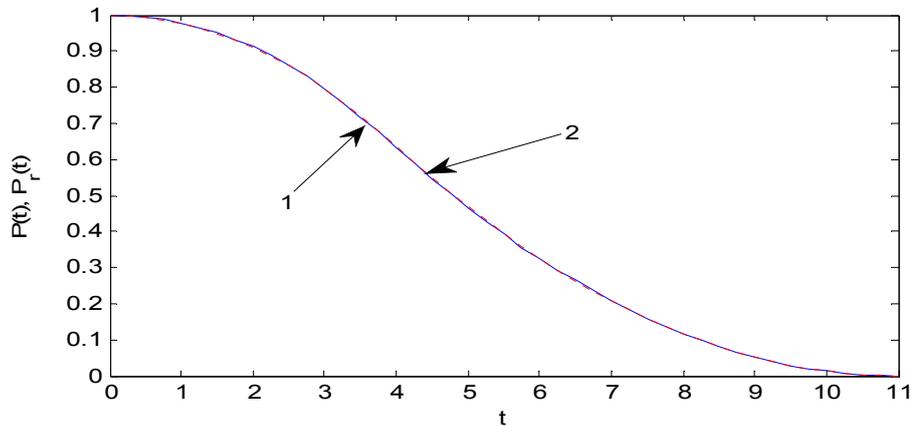


Рис. 1. Вероятности безотказной работы

На рис. 2 приведены интенсивности отказов (ИНО): 1 – ИНО для аналитической модели (16); 2 – ИНО для численной модели (18) с учетом (17). Графическое представление моделей до времени 8 хорошо совпадает.

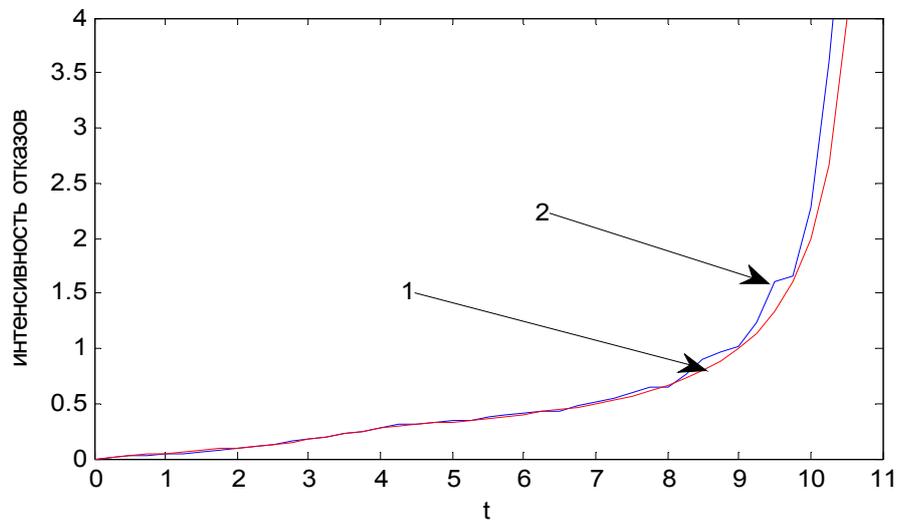


Рис. 2. Интенсивности отказов

На рис. 3 приведены вероятности безотказной работы для остаточного ресурса (ВБРОР) ($x = 4$): 1 – ВБРОР для аналитической модели (5); 2 – ВБРОР для численной модели (12). Графическое представление моделей хорошо совпадает. При тестировании численных алгоритмов показателей надежности (10), (11), (13) и (14) использовались аналитические модели, полученные в работе [1], но в данной работе не представленные.

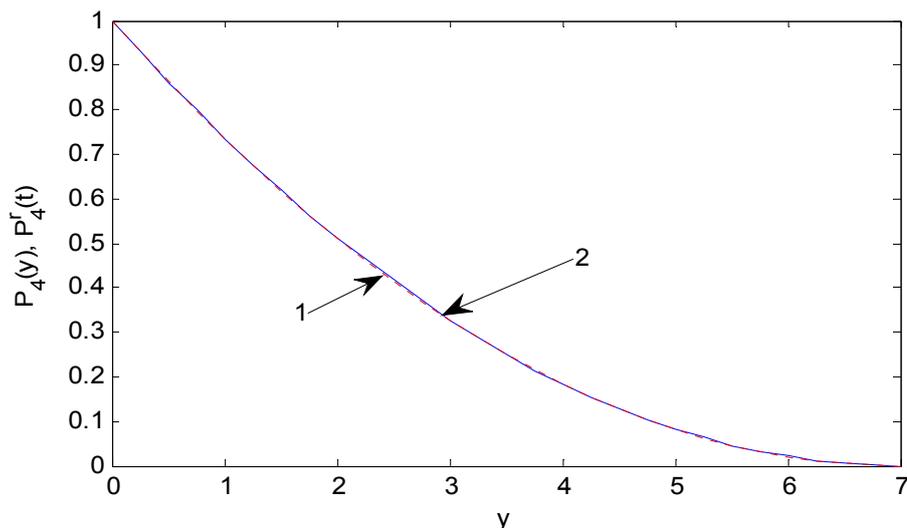


Рис. 3. Вероятности безотказной работы для остаточного ресурса

Средняя наработка до отказа по аналитической модели равна 5, а по численной (10) – 4,997.

Гамма-процентный ресурс до отказа по аналитической модели при $\gamma = 0,9$ равен 2,098, а по численной (11) – 2,080.

Средний остаточный ресурс до отказа при $x = 2$ по аналитической модели равен 3,367, а по численной (13) – 3,371.

Средний остаточный ресурс до отказа при $x = 6$ по аналитической модели равен 1,667, а по численной (13) – 1,659.

Численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа при $x = 2$ и $\gamma = 0,9$ по аналитической модели равен 0,828, а по численной (14) – 0,831.

Численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа при $x = 6$ и $\gamma = 0,9$ по аналитической модели равен 0,257, а по численной (14) – 0,255.

Значения, полученные по численным моделям, близки к значениям, полученным по аналитическим моделям. Это показывает высокую адекватность численных алгоритмов вычисления показателей надежности рельсового скрепления, полученных в данной работе.

Выводы

1. Предложены численные алгоритмы для вычисления показателей надежности рельсовых скреплений типа APC, основанные на результатах имитационного моделирования. Показателями надежности являются: вероятность безотказной работы, интенсивность отказа, вероятность безотказной работы для остаточного ресурса, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс, средний остаточный ресурс до отказа, гамма-процентный остаточный ресурс.

2. Проведено сравнение результатов, полученных по численным алгоритмам и по аналитическим на основе треугольного распределения. Значения, полученные по численным алгоритмам, оказались близкими к значениям, полученным по аналитическим моделям. Это показывает высокую адекватность численных алгоритмов вычисления показателей надежности рельсового скрепления, предложенных в данной работе.

Библиографический список

1. Даваадорж Б. Аналитический анализ надежности рельсового скрепления пути при ограниченном объеме / Б. Даваадорж, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 2 (50). – С. 56–62.
2. Начигин В. А. Металлические части пути как компоненты его эффективной эксплуатации / Ю. М. Краковский, В. А. Начигин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Седьмой международной НПК. – Иркутск, 2016. – С. 408–413.
3. Давааням Т., Краковский Ю. М. Разработка многофакторных моделей прогнозирования грузооборота и объема перевезенных грузов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 4 (44). – С.110–113.
4. Краковский Ю. М., Домбровский И. А. Прогнозирование показателей грузовых перевозок Улан-Баторской железной дороги // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 4 (13). – С. 225–228.
5. Домбровский И. А. Вероятностный анализ безубыточности грузовых перевозок на основе метода Монте-Карло / И. А. Домбровский, Ю. М. Краковский // Известия Трансиба. – 2013. – № 1 (13). – С. 125–130.
6. Нго З. Д. Имитационная модель многокомпонентного оборудования для определения закона распределения его наработки / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 7. – С. 25–32.
7. Нго З. Д. Вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 10. – С. 15–20.
8. Краковский Ю. М. Численные модели оценки показателей надежности многокомпонентного оборудования по результатам компьютерного моделирования / Ю. М. Краковский, О. А. Захарова, З. Д. Нго // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 66–70.
9. Краковский Ю. М. Численные модели оценки коэффициента оперативной готовности и параметра потока восстановления многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 131–136.



УДК 535.54

В. И. Иванов¹, Ю. О. Перков²

ФОТОПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО И ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТОВ

Аннотация. В работе предложен фотоприемник излучения на основе пироэлектрического кристалла. Использование одновременно пироэлектрического и фотогальванического эффектов позволяет расширить частотный диапазон фотоприемника.

Ключевые слова: пироэлектрический эффект, фотогальванический эффект, фотоприемник, ниобат лития.

Об авторах:

¹Д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры «Физика и теоретическая механика», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, e-mail: ivanov@festu.khv.ru.

²Магистрант, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, e-mail: tmeh@festu.khv.ru.

V. I. Ivanov, J. O. Percov

A PHOTODETECTOR BASED ON THE PHOTOVOLTAIC AND PYROELECTRIC EFFECTS

Abstract. *The photodetector based on the pyroelectric crystal is proposed. Using the pyroelectric and simultaneously photovoltaic effects allows you to extend the frequency range of a photodetector.*

Keywords: *pyroelectric effect, photovoltaic effect, photodetector, lithium niobate.*

Пирозлектрические приемники излучения (ППИ) нашли широкое применение в различных областях науки и техники для регистрации излучения в широком спектральном диапазоне [1]. По сравнению с другими типами приемников они обладают целым рядом преимуществ – в частности, высокой вольт-ваттной чувствительностью. Однако частотная зависимость этой чувствительности имеет спады в области низких и высоких частот модуляции излучения. Низкочастотный спад чувствительности объясняется тем, что пироток пропорционален производной от температуры по времени и стремится к нулю на низких частотах [1]. Спад чувствительности в области высоких частот обусловлен тепловой инерционностью чувствительного элемента. Для решения целого ряда задач исследование параметров излучения (в частности, формы импульса) необходимо проводить без специальной модуляции. Такие исследования возможно проводить только приемниками излучения с равномерной частотной зависимостью вольт-ваттной чувствительности [2–5].

Для получения равномерной частотной зависимости вольт-ваттной чувствительности в данной работе предлагается фотоприемник (ФП), в котором в качестве чувствительного элемента используется кристалл (например, ниобат лития), проявляющий два эффекта: пирозлектрический [1] и фотогальванический [6].

Целью данной работы является аналитическое исследование частотной зависимости вольт-ваттной чувствительности предлагаемого ФП.

Рассмотрим фотогальванический и пирозлектрический отклики на примере кристалла ниобата лития. Структурная схема ФП представлена на рис. 1.

При исследовании фотогальванического эффекта (ФГЭ) в ниобате лития с примесями железа и меди установлено, что плотность стационарного тока J пропорциональна интенсивности лазерного излучения $\Phi(t)$: $J_{\Phi} = \alpha K_{\Gamma} \Phi(t)$, где K_{Γ} – константа Гласса, зависящая от природы поглощающих центров и длины волны излучения и не зависящая от геометрии кристалла, конфигурации электродов и концентрации примесей, α – коэффициент поглощения [6].

Пусть на чувствительный элемент падает поток излучения $\Phi(t) = A\Phi_0(1 + \cos \omega t)$, где Φ_0 – плотность потока излучения, ω – частота модуляции излучения, A – площадь облучаемой поверхности. Принимаем, что толщина кристалла мала ($\alpha L \ll 1$), так что фототок однороден по объему кристалла.

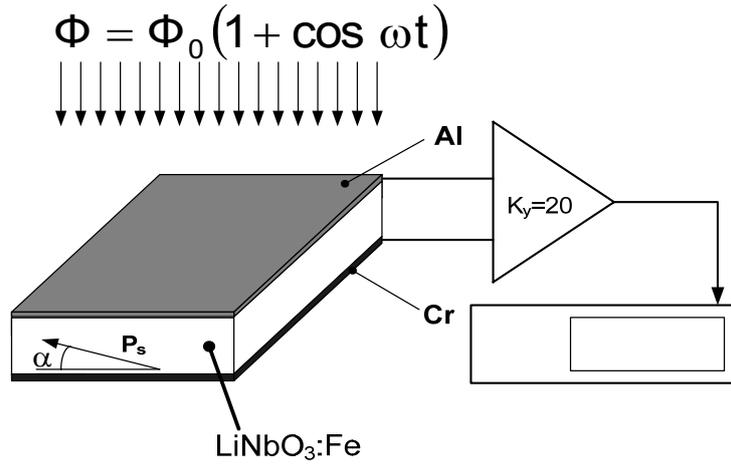


Рис. 1. Структурная схема ФП

Чтобы получить выражение для вольт-ваттной чувствительности предлагаемого приемника, необходимо получить решение дифференциального уравнения для выходного сигнала (напряжения на сопротивлении нагрузки R_H) в соответствии со схемой замещения (рис. 2).

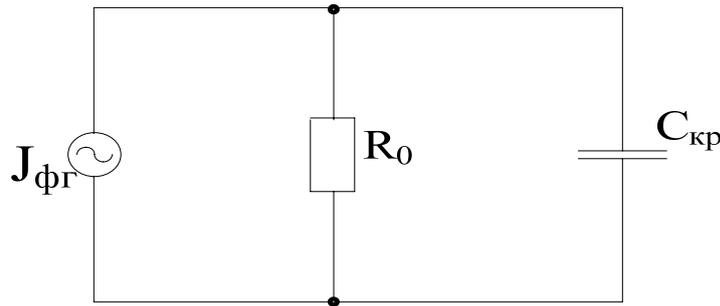


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения приемника: $J_{\text{фг}}$ – источник фотогальванического тока; R_0 – суммарное сопротивление кристалла и нагрузки; $C_{\text{кр}}$ – емкость кристалла

Уравнение без учета процессов самоиндукции имеет вид:

$$C_{\text{кр}} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R_0} = J_{\text{фг}}, \quad (1)$$

где U – выходной сигнал на сопротивлении нагрузки, $C_{\text{кр}}$ – емкость кристалла, $R_0^{-1} = R_{\text{кр}}^{-1} + R_{\text{н}}^{-1}$ ($R_{\text{кр}}$, $R_{\text{н}}$ – сопротивления кристалла и нагрузки соответственно), $J_{\text{фг}} = \alpha K_{\Gamma} A \Phi(t)$.

Решив уравнение, получим выражение для амплитуды гармоники напряжения:

$$U_{\omega} = \frac{\alpha A K_{\Gamma} \Phi_0 R_0}{(\omega^2 \tau_s^2 + 1)}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{э}} = R_0 C_{\text{кр}}$ – электрическая постоянная.

Вольт-ваттная чувствительность ФП определяется как [1]:

$$S_{\phi^2}^{\text{В-В}}(\omega) = \frac{U_{\omega}}{F_0 A}. \quad (3)$$

Используя полученное выше решение, имеем:

$$S_{\phi^2}^{\text{В-В}}(\omega) = \frac{\alpha K_{\Gamma} R_0}{\omega^2 \tau_{\text{э}}^2 + 1}. \quad (4)$$

Как видно из полученного выражения, вольт-ваттная чувствительность постоянна в диапазоне частот $0 < \omega < \tau_{\text{э}}^{-1}$ и равна $S_{\phi^2}^{\text{В-В}}(0) = \alpha K_{\Gamma} R_0$.

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику для вольт-ваттной чувствительности пироэлектрического отклика.

Уравнение для пироэлектрического отклика имеет вид (эквивалентная схема замещения приемника аналогична таковой для фотогальванического тока) [1]:

$$C_{\text{кр}} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R_0} = A\gamma \frac{dT}{dt}, \quad (5)$$

где A – площадь чувствительного элемента, γ – пироэлектрический коэффициент, T – температура кристалла, t – время,

Чтобы получить выражение для вольт-ваттной чувствительности пироприемника, необходимо решить уравнение теплового баланса для чувствительного элемента:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau_T} = \frac{\alpha \Phi(t)}{c_p A}, \quad (6)$$

где c_p – удельная теплоемкость кристалла; $\tau_T = c_p \rho L (2\kappa)^{-1}$ – тепловая постоянная времени, определяемая коэффициентом конвективного теплообмена κ поверхности кристалла с окружающей средой, L – толщина кристалла.

Амплитуда переменной составляющей температуры (3) представляет собой следующее выражение:

$$T_{\omega} = \frac{\alpha L \Phi_0}{2\kappa(1 + \omega^2 \tau_T^2)}. \quad (7)$$

Подставляя в (5) решение уравнения теплопереноса, получаем вольт-ваттную чувствительность пироприемника [1]:

$$S_n^{\text{В-В}}(\omega) = \frac{\alpha \tau_T \omega \gamma A R_0}{c_p \rho (1 + \omega^2 \tau_{\text{э}}^2)^{0,5} (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{0,5}}. \quad (8)$$

Анализ полученного выражения показывает, что вольт-ваттная чувствительность постоянна в диапазоне частот $\tau_3^{-1} < \omega < \tau_T^{-1}$. В этом диапазоне чувствительность равна:

$$S_n^{6-6}(\omega_0) \approx \frac{\alpha \tau_T \gamma A R_0}{c_p \rho \tau_3}, \quad (9)$$

Если использовать в качестве чувствительного элемента фотоприемника кристалл с обоими эффектами – пьезоэлектрическим и фотогальваническим (например, ниобат лития), то фототок будет состоять из двух слагаемых. Выбирая параметры кристалла (размеры, удельное сопротивление и т. д.) так, чтобы $S_n^{6-6}(\omega_0) \approx S_{\text{фз}}^{\text{Б-В}}(0)$, можно достичь постоянной чувствительности в диапазоне $0 < \omega < \tau_T^{-1}$:

$$S_{\Sigma}^{6-6}(\omega) = \left\{ \frac{\omega \tau_3 S_{\text{фз}}^{\text{Б-В}}(0)}{(1 + \omega^2 \tau_3^2)^{0,5} (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{0,5}} + \frac{S_{\text{фз}}^{\text{Б-В}}(0)}{\omega^2 \tau_3^2 + 1} \right\}. \quad (10)$$

Отклонение характеристики от равномерной (при $\omega \tau_3 \approx 1$) может быть скомпенсировано с помощью полосового фильтра.

Таким образом, рассмотренный ФП обладает равномерной вольт-ваттной чувствительностью в широком частотном диапазоне, включая инфранизкие частоты, что значительно расширяет возможности его использования (в частности, определяет его пригодность для исследования формы сигнала) [7–9].

Библиографический список

1. Косоротов В. Ф. Пьезоэлектрический эффект и его применения / В. Ф. Косоротов, Л. С. Кременчугский, В. Б. Самойлов, Л. В. Щедрина ; под ред. Л. С. Кременчугского ; АН УССР. Ин-т физики. – Киев : Наукова думка, 1989. – 224 с.
2. Иванов В. И. Термостимулированные токи в несимметричной сэндвичной структуре металл – сегнетоэлектрик – металл / В. И. Иванов, Ю. М. Карпец, С. В. Климентьев. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. – 67 с.
3. Иванов В. И. Тепловые приемники излучения на основе тонкослойных структур металл – сегнетоэлектрик – металл / В. И. Иванов, Ю. М. Карпец, С. В. Климентьев. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. – 80 с.
4. Здоровцев Г. Г. Термостимулированная ЭДС в сэндвичной структуре металл – ниобат лития – металл / Г. Г. Здоровцев, В. И. Иванов, Н. В. Марченков // Информатика и системы управления. – 2005. – № 1 (09). – С. 55–60.
5. Иваненко К. Ю. Распределение интенсивности излучения лазерного диода / К. Ю. Иваненко, А. И. Илларионов, О. В. Горева // Вопросы естествознания. – 2014. – № 1 (2). – С. 97–106.
6. Стурман Б. И. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления / Б. И. Стурман, В. М. Фридкин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 208 с.
7. Иванов В. И. Термоэдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов / В. И. Иванов, Ю. М. Карпец, С. В. Климентьев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2001. – № 1. – С. 96–97.
8. Здоровцев Г. Г. Характеристики приемника излучения на основе структуры металл – сегнетоэлектрик – металл / Г. Г. Здоровцев, В. И. Иванов, С. В. Климентьев, В. В. Криштоп // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 8. – С. 45–46.

9. *Иванов В. И.* Использование динамического пироэффекта в термовольтаическом приемнике излучения / В. И. Иванов, С. В. Климентьев, В. В. Корчевский // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 2. – С. 013–018.



ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ



Математика
Физика
Астрономия
Фармацевтические науки
Науки о Земле



УДК 541.128.3

Д. С. Штарев^{^1}, А. В. Штарева^{^2}, А. В. Зайцев^{^3}

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ФЕНОЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАТАЛИЗАТОРА ВИСМУТАТ КАЛЬЦИЯ – ОКСИД ВИСМУТА

Аннотация. В статье представлено исследование фотокаталитического разложения водного раствора фенола под воздействием катализаторов видимого света в форме гетерогенной смеси $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}\text{--Bi}_2\text{O}_3$ и форме нестехиометричного висмутата кальция $\text{Ca}_{0,2}\text{Bi}_{0,8}\text{O}_{1,19}$. Проведено биотестирование фотостимулированных продуктов разложения фенола. Показано влияние способа получения фотокатализатора на их фотокаталитическую активность и токсичность продуктов распада фенола.

Ключевые слова: висмутат кальция, оксид висмута, катализатор видимого света, каталитическая деструкция фенола, токсичность.

Об авторах:

^{^1} К. ф.-м. н., доцент кафедры «Физика и теоретическая механика», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, e-mail: shtarev@mail.ru.

^{^2} М. н. с. Института тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, e-mail: shtarevaav@mail.ru.

^{^3} Инженер Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН, Хабаровск, e-mail: alex-im@mail.ru.

D. S. Shtarev, A. V. Shtareva, A. V. Zaycev

RESEARCH OF THE TOXIC EFFECTS OF PRODUCTS OF THE PHENOL PHOTOSTIMULATED DECOMPOSITION USING A CALCIUM BISMUTHATE – BISMUTH OXIDE CATALYST

Abstract. Presented article is devoted to the study of the catalytic degradation of phenol in aqueous solution using a variety of visible light photocatalysts. The photocatalysts have been used as the compound based on calcium bismuthate: in the form of heterogeneous composition $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}\text{--Bi}_2\text{O}_3$ and in the form of non-stoichiometric calcium bismuthate $\text{Ca}_{0,2}\text{Bi}_{0,8}\text{O}_{1,19}$. Investigations were carried out on the model aqueous solutions of phenol. It is shown that a method for producing a photocatalyst greatly influences the decomposition rate of phenol. In the bioassay studied toxic effects of phenol decomposition products photostimulated at various test sites. It is found that by using a photocatalyst in a form of heterogeneous composition photoinduced decomposition products are no more toxic than the starting aqueous solution of phenol. On the other hand, using a photocatalyst in the form of non-stoichiometric calcium bismuthate causes toxicity of phenol photoinduced decomposition product that considerably exceeds the original aqueous solution of phenol.

Keywords: calcium bismuthate, bismuth oxide, visible light catalyst, catalytical decomposition of phenol, toxicity.

Введение

Использование полупроводниковых фотокатализаторов для очистки воды и воздуха от загрязняющих веществ является очень перспективной и экологически дружелюбной технологией. Такой подход позволяет использовать чистую, безопасную и возобновляемую солнечную энергию для уменьшения давления, оказываемого со стороны промышленных предприятий на окружающую среду. Среди материалов, обладающих фотокаталитическими свойствами, наиболее полно и широко исследован диоксид титана (TiO_2), являющийся наилучшим фотокатализатором для окислительного разложения органических соединений. Однако TiO_2 характеризуется большой шириной запрещенной зоны, поэтому область его спектральной чувствительности лежит в УФ-части спектра. Это ограничивает возможности практического использования диоксида титана, что делает актуальным поиск и изучение свойств новых фотокатализаторов с меньшей шириной запрещенной зоны, чувствительных к излучению видимого диапазона.

В последнее время возрос интерес [1–11] к фотокатализаторам видимого света на основе висмутатов щелочноземельных металлов, в частности, к композициям на основе висмутата кальция [1, 2] и стронция [3, 4]. В работах [1, 8] показано, что фотокаталитическая композиция $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}\text{-Bi}_2\text{O}_3$ инициирует разложение метиленового синего в воде под действием видимого света. В [5] впервые показана принципиальная возможность разложения дизельного топлива видимым светом в присутствии композиции $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}\text{-Bi}_2\text{O}_3$. Результаты были получены на модельных стоках. В [6, 9] обобщены результаты по очистке реальных сточных вод различных предприятий от нефтепродуктов [9] и фенолов [6], а также предложена модель технологии очистки сточных вод промышленных предприятий от различных органических поллютантов [6].

Однако снижение концентрации того или иного поллютанта в образцах воды не может служить абсолютным показателем, характеризующим качество работы фотокатализатора. Может сложиться ситуация, когда в ходе фотостимулированной деструкции поллютанта образуются новые соединения, обладающие гораздо большей токсичностью и, как следствие, оказывающие гораздо большее негативное влияние на экосистему. В представленной работе исследуется вопрос токсичности продуктов фотодеструкции поллютантов на примере модельного раствора фенола. При этом исследуются фотокатализаторы, полученные различными способами и характеризующиеся различными скоростями разложения фенола.

1. Получение фотокатализаторов

Известно [11], что способ получения катализаторов подобного класса может существенно влиять на их каталитические свойства. Поэтому для проведения исследования фотокатализаторы на основе висмутата кальция были получены двумя методами [7]: I – методом соосаждения и II – экстракционно-пиролитическим.

Метод соосаждения (I) заключался в растворении 9,799 г пятиводного нитрата висмута $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 2,385 г четырехводного нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и 1,468 г этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) в 30 мл двухмолярного водного раствора HNO_3 . Затем в полученную смесь добавлялся 35%-й раствор аммиака до выпадения белого осадка. Затем pH этого раствора доводилось до 8. После выстаивания при комнатной температуре в течение 2 часов осадок отфильтровывался, трижды промывался в дистиллированной воде и высушивался при 100 °C до полного удаления вла-

ги. Далее полученный прекурсор отжигался при 350 °С в течение 10 часов и при 650 °С – 12 часов.

Для получения фотокатализаторов экстракционно-пиролитическим методом (II) 10,0 г пятиводного нитрата висмута $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 0,9712 г четырехводного нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ истиралось в агатовой ступе с 5,0 г сорбита до образования растворимой смеси органических комплексов. Затем полученный раствор оставляли в течение суток на воздухе при комнатной температуре до самопроизвольного образования однородной пенистой массы. После этого органическую матрицу с гомогенно распределенными атомами висмута и кальция отжигали при 350 °С в течение 8–10 часов. В результате этого по всему объему смеси образовывались наночастицы аморфного висмутата кальция. На следующем этапе аморфные наночастицы висмутата кальция отжигали при 550 °С в течение 4 часов для формирования в наночастицах кристаллической решетки.

2. Экспериментальное оборудование и методы

Для характеристики полученных фотокатализаторов были использованы методы рентгенофазового анализа и адсорбции паров азота. При этом использовался рентгеновский дифрактометр Bruker D8 advance (Cu-K излучение), линейный детектор Vantec и метод БЭТ (Sorbi 4.2).

Разложение фенолов излучением видимого диапазона в присутствии фотокатализаторов осуществлялось в экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. В качестве источника излучения (1) использовалась металлогалогенная лампа высокого давления HQI-TS 150 W/NDL (Osram, Германия) мощностью 150 Вт. Для предотвращения воздействия ультрафиолетового излучения на фотокатализатор и водный раствор фенола использовались стандартные светофильтры ЖС-10 (2). Облучение смеси водного раствора фенола и фотокатализатора осуществлялось в стеклянных стаканах (3). Соотношение между количеством фотокатализатора и водным раствором фенолов (4) составляло 200 мг / 50 мл. Магнитные мешалки (5) работали в режиме ламинарного перемешивания с частотой вращения 150–200 об./мин.

Определение концентрации нефтепродуктов до и после облучения производилось

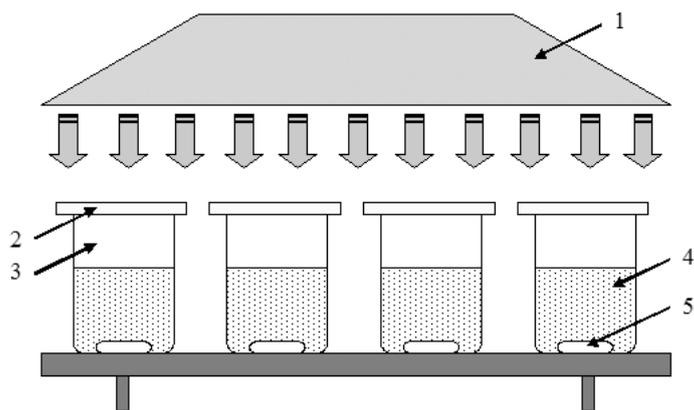


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лампа; 2 – светофильтры; 3 – стеклянные стаканы; 4 – водные растворы фенола с добавлением фотокатализатора на основе висмутата кальция; 5 – магнитные мешалки

флюоресцентным методом с использованием спектрофлюориметра «Флюорат 02-М» по известной методике [12]. Для дальнейшего разложения в экспериментах использовался фенол качества «Х.Ч.» (Acros), а его исходная концентрация в воде составляла 2,8 мг/л, что оптимально для оценки каталитических свойств [10].

Биологическое тестирование водного раствора фенола после облучения в присутствии фотокатализа-

тора проводилось двумя методами: методом определения индекса токсичности (Т) и методом определения токсичной кратности разбавления (ТКР).

Метод определения индекса токсичности основан на способности тест-объектов (инфузорий) реагировать на присутствие в водных вытяжках из отходов веществ, представляющих опасность для их жизнедеятельности, и перемещаться в направлении изменения концентраций этих веществ, избегая их вредного воздействия. Критерием токсического действия является значимое различие в числе клеток инфузорий, наблюдаемых в пробе, не содержащей токсических веществ (контроль), по сравнению с этим показателем, наблюдаемым в анализируемой пробе (опыт). Количественная оценка параметра тест-реакции, характеризующего токсическое действие, производится путем расчета соотношения числа клеток инфузорий, наблюдаемых в контрольной и анализируемой пробах, и выражается в виде безразмерной величины – индекса токсичности (Т) [13].

Методика ТКР основана на регистрации различий в оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer), выращенной на среде, не содержащей токсических веществ (контроль) и тестируемых проб, в которых эти вещества могут присутствовать. Измерение оптической плотности суспензии водоросли позволяет оперативно контролировать изменение численности клеток в контрольном и опытном вариантах острого токсикологического эксперимента. Критерием токсичности является снижение (подавление роста) или увеличение (стимуляция роста) оптической величины культуры водоросли, выращиваемой в течение 22 часов, по сравнению с ее ростом на контрольной среде [14].

3. Результаты

На рис. 2 приведены рентгенограммы полученных фотокатализаторов на основе висмутата кальция. Видно, что оба выбранных метода позволяют получить фотокатализаторы с хорошо сформированными кристаллическими структурами.

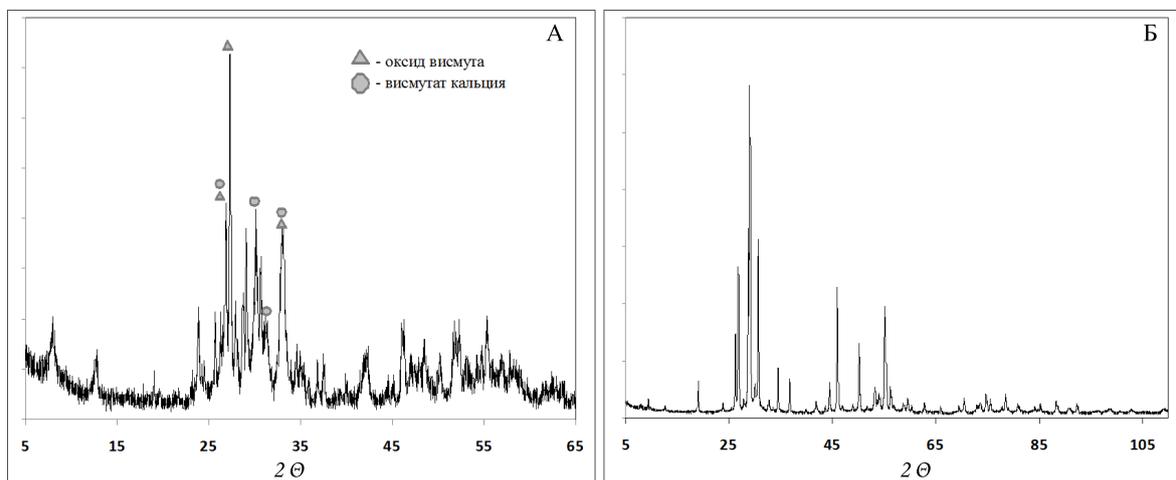


Рис. 2. Рентгенограммы фотокатализаторов, полученных различными способами:
А – методом соосаждения; Б – экстракционно-пиролитическим методом

Методом соосаждения формируется фотокаталитическая композиция, состоящая из оксида висмута Bi_2O_3 , покрытая висмутатом кальция ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaBi}_6\text{O}_{10}$). Экстракционно-пиролитическим методом формируется висмутат кальция $\text{Ca}_{0,2}\text{Bi}_{0,8}\text{O}_{1,19}$.

Методом адсорбции паров азота были установлены удельные площади поверхности частиц фотокатализаторов, полученных различными методами. Синтезированные

методом соосаждения частицы фотокатализатора ($\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaBi}_6\text{O}_{10}$) имеют удельную площадь поверхности $2,7 \text{ м}^2/\text{г}$. Частицы фотокатализатора, полученные экстракционно-пиролитическим методом ($\text{Ca}_{0,2}\text{Bi}_{0,8}\text{O}_{1,19}$), имеют удельную площадь поверхности $5,2 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для оценки каталитических свойств полученных фотокатализаторов был проведен эксперимент по фотостимулированному разложению фенола в водном растворе видимым светом в присутствии фотокатализаторов. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

Для оценки токсического воздействия продуктов разложения фенола в ходе каталитической деструкции было проведено биотестирование исходного водного раствора фенола и продуктов фотокаталитической деструкции фенола в присутствии различных фотокатализаторов. Результаты биотестирования представлены в табл. 1.

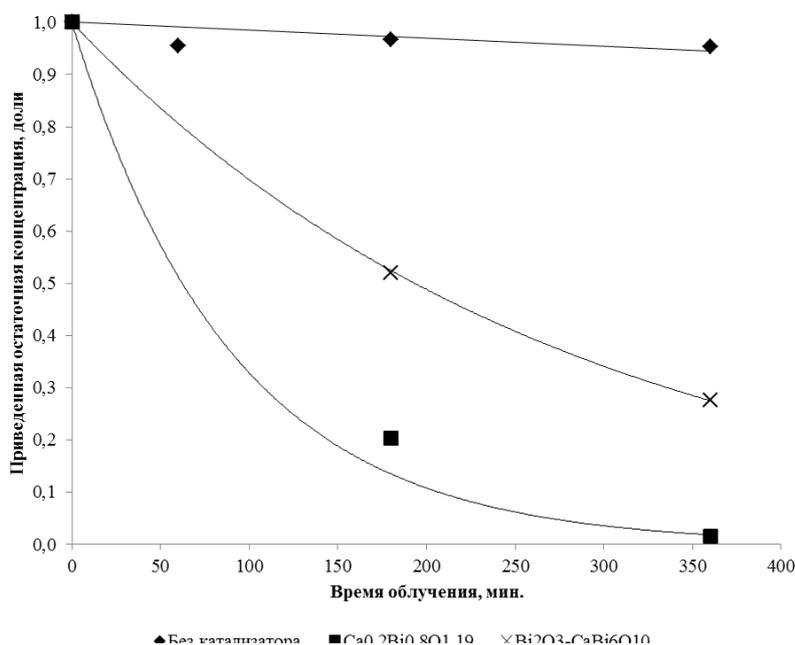


Рис. 3. Разложение фенола в водном растворе видимым светом в присутствии фотокатализаторов, полученных различными способами

Таблица 1

Результаты биотестирования

Образец	ТКР, крат.	Удельная токсичность (Т), у.е.
Исходный водный раствор фенола	6,0	0,32
Водный раствор фенола после фотокаталитической деструкции в присутствии композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CaBi}_6\text{O}_{10}$	4,0	0,11
Водный раствор фенола после фотокаталитической деструкции в присутствии $\text{Ca}_{0,2}\text{Bi}_{0,8}\text{O}_{1,19}$	15,0	0,32

4. Заключение

Из сопоставления данных по скорости разложения фенолов в присутствии исследуемых фотокатализаторов с данными биотестирования можно заключить, что разложение фенолов в присутствии фотокатализатора, полученного методом соосаждения, протекает медленнее, однако продукты деструкции фенолов являются менее токсичными, чем исходный фенол. При использовании фотокатализатора, полученного экстракционно-пиролитическим методом, разложение фенола протекает существенно быстрее, однако продукты его разложения оказываются значительно токсичнее исходного фенола.

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность химико-радиометрической лаборатории КЦЭМП КГКУ «Управление по делам ГОЧС и ПБ Хабаровского края» за помощь в проведении биотестирования.

Библиографический список

1. Wang Y. Photocatalytic degradation of methylene blue on $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ composites under visible light / Y. Wang, Y. He, T. Li, J. Cai, M. Luo, L. Zhao // *Chemical Engineering Journal*. – 2012. – Т. 189–190. – С. 473–481.
2. Wang Y. Novel $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}$ photocatalyst for methylene blue degradation under visible light irradiation / Y. Wang, Y. He, T. Li, J. Cai, M. Luo, L. Zhao // *Catalyst Communication*. – 2013. – Т. 18. – С. 161–164.
3. Shan Z. C. Preparation and photocatalytic activity of novel efficient photocatalyst $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5$ / Z. C. Shan, Y. J. Xia, Y. X. Yang, H. M. Ding, F. Q. Huang // *Materials Letter*. – 2009. – Т. 63. – С. 75–77.
4. Hu C. Efficient destruction of pathogenic bacteria with $\text{NiO}/\text{SrBi}_2\text{O}_4$ under visible light irradiation / C. Hu, X. X. Hu, J. Guo, J. H. Qu // *Environmental Science Technology*. – 2006. – Т. 40. – С. 5508–5513.
5. Shtarev D. S. Photocatalytic degradation of the diesel fuel by using the calcium bismuthate – bismuth oxide photocatalyst composition / D. S. Shtarev, A. V. Shtareva // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Т. 377. – С. 204–208.
6. Штарев Д. С. Технология каталитической очистки сточных вод промышленных предприятий с применением катализаторов видимого света / Д. С. Штарев, А. В. Штарева // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2014. – Т. 1. – № 2 (18). – С. 102–108.
7. Штарев Д. С. Синтез и исследование активности фотокатализаторов на основе висмутатов щелочноземельных элементов / Д. С. Штарев, А. В. Штарева // *Бюллетень научных сообщений*. – 2013. – № 18. – С. 54–67.
8. Перегиняк М. В. Фотокаталитическое разложение метиленового синего на составляющие $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ под видимым светом / М. В. Перегиняк, А. В. Сую, Д. С. Штарев // *Бюллетень научных сообщений*. – 2013. – № 18. – С. 67–82.
9. Штарев Д. С. Очистка сточных вод предприятий от нефтепродуктов: опыт применения фотокатализаторов видимого света на основе висмутатов щелочноземельных металлов / Д. С. Штарев, А. В. Штарева, А. В. Зайцев // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. – 2014. – № 4. – С. 88–92.
10. Shtarev D. S. Synthesis and photocatalytic properties of alkaline earth metals bismuthates – bismuth oxide compositions / D. S. Shtarev, A. V. Shtareva, A. V. Syuy, M. V. Pereginiak // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. – 2016. – Т. 127. – С. 1414–1420.
11. Штарев Д. С. О механизме влияния способа получения висмутатов щелочноземельных металлов на их оптические и каталитические свойства / Д. С. Штарев, И. С. Доронин, А. И. Блох, А. В. Штарева // *Бюллетень научных сообщений*. – 2015. – № 20. – С. 14–25.
12. ПНД Ф 14.1: 2:4.182-02. Методика измерения массовой концентрации Фенолов в пробах природных, питьевых и сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости Флюорат-02 МУК 4.1.1263-03. – М. : Люмэкс, 2002. – 29 с.
13. ФР.1.31.2005.01882 (ред. 2010). Методика определения токсичности проб почв, донных отложений и осадков сточных вод экспресс-методом с применением прибора «Биотестер». – СПб. : СПЕКТР-М, 2010. – 20 с.
14. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 (ПНД Ф Т 16.1:2:3:3.7-04). Методика определения токсичности проб поверхностных пресных, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer). – М. : Люмэкс, 2002. – 30 с.



НАУКИ О ЗЕМЛЕ



Математика
Физика
Астрономия
Фармацевтические науки
Науки о Земле



УДК 550.837

И. А. Ингеров^{^1}, Т. В. Рудак^{^1}, Е. Ю. Ермолин^{^2}

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ 4–8-КАНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНАЯ АППАРАТУРА ПОКОЛЕНИЯ 5+

Аннотация. *Появившееся на рубеже веков 5-е поколение многофункциональной электроразведочной аппаратуры дало принципиальный скачок в развитии электроразведочных методов. Новые свойства аппаратуры включают легкий вес, малые габариты и энергопотребление, простоту в эксплуатации, высокую точность регистрируемых параметров. Одним из определяющих признаков является применение 24-разрядного аналого-цифрового преобразователя. Развитие микропроцессорной базы, а также компьютерной техники позволяет в настоящее время существенно улучшить потребительские возможности аппаратуры 5-го поколения, т. е. перейти к поколению 5+. Супермногофункциональные 4- и 8-канальные приборы могут быть использованы как в автоматическом режиме, так и под управлением оператора. Для этого они имеют эффективный сенсорный экран и удобный интерфейс связи с компьютером, планшетом или смартфоном. Приборы имеют гибкую систему конфигурирования электрических и магнитных каналов (каналы взаимозаменяемы), т. е. один и тот же прибор может быть использован для таких, казалось бы, несовместимых методов, как электропрофилирование, ВП, электротомография, ЗС, МТЗ и МВП. Применение высокочастотных АЦП и соответствующих процессоров позволяет существенно повысить частотный диапазон исследований, а также возможности фильтрации сигнала. Приборы комплектуются широкодиапазонными датчиками электрических и магнитных компонент ЭМ-поля, а также переносным широкодиапазонным генератором.*

Ключевые слова: *электроразведка, многофункциональная аппаратура, прецизионные треноги для установки магнитных датчиков, малошумящие неполяризующиеся электроды.*

Об авторах:

^{^1} *Advanced Geophysical Operations and Services Inc., Торонто, Канада.*

^{^2} *Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург.*

I. A. Ingerov, T. V. Rudak, E. Yu. Ermolin

MULTIFUNCTION 4 AND 8 CHANNEL ELECTROPROSPECTING INSTRUMENTS OF THE GENERATION 5+

Abstract. *Appearance at the turn of the century of the 5th generation multifunction electroprospecting instruments has made significant contribution to the development of electroprospecting techniques. New properties of the equipment include light weight, compactness, low power consumption, simple operation, high accuracy of the recorded parameters. One of the defining features is the application of 24-bit ADC. Technological advancements in the microprocessor development and computer technology allowed significantly improving hardware capabilities of the 5th generation instruments, i. e. going to 5+. Supermultifunction 4- and 8-channel receivers can be used in both autonomous and manual modes (operator control). Receivers have intuitive user interface implemented on touch-screen display and several communication modes with a PC, touchpad, and smartphone. Instruments have flexible configuration of electric and magnetic channels (channels are interchangeable), which allows to use same receiver for such seemingly incompatible methods as Electrical Profiling, IP, Electrotomography, TDEM, MT and MVP. Application of wideband high frequency ADCs and corresponding processors can significantly improve the frequency range of field investigations, as well as noise filtering capabilities. Data acquisition systems are equipped with wideband electric and magnetic components EM-field sensors, as well as a wideband portable transmitter.*

Keywords: *electroprospecting, multifunction instruments, precision field tripods for magnetic sensors installation, low-noise non-polarizing electrodes.*

1. Многофункциональная электроразведочная аппаратура

Как уже отмечалось рядом авторов [1–5], можно выделить 5 поколений многофункциональной аппаратуры, обладающих четко выраженными отличительными признаками. Первое поколение было разработано и выпускалось в бывшем Советском Союзе в 50–70-х годах прошлого столетия. Эта аппаратура имела 2 или 5 каналов, аналоговые усилители и фильтры. Регистрация электрического и магнитного полей выполнялась с помощью осциллографа на чувствительную фотобумагу. Аппаратура была простой по устройству, легкой, переносной, имела умеренное энергопотребление (батарея). Эта аппаратура (МТЛ-62, МТЛ-71) была выпущена во многих экземплярах и широко применялась на территории бывшего СССР для реализации методов: МТЗ, МТП, теллурических токов (ТТ), ЗС, ВЭЗ, ДЭЗ. Главной трудностью в эффективном применении этой аппаратуры была трудозатратная ручная обработка полевых записей. Второе поколение многофункциональной аппаратуры было создано в 60-х – начале 70-х годов прошлого столетия (ЦЭС-1, ЦЭС-2). Регистрация ЭМ-поля в этой аппаратуре осуществлялась на бытовую магнитную ленту (ширина 6,25 мм) в виде цифрового кода с помощью прецизионного магнитофона. Обработка полевых записей осуществлялась на специальных вычислительных центрах на цифровых ЭВМ. Несмотря на значительный шаг вперед (цифровая регистрация, обработка данных на ЭВМ), аппаратура имела существенные недостатки: сложная электронная схема, реализуемая на транзисторной элементной базе; значительные габариты и вес, требующие установки аппаратуры в кузове грузового автомобиля; большое энергопотребление (более 200 Вт). Аппаратура ЦЭС-1 и ЦЭС-2 была выпущена тиражом более 700 экземпляров и широко использовалась на территории бывшего СССР в 70–90-х годах прошлого столетия для выполнения полевых работ методами МТЗ, ЗС в дальней зоне, ЗС в ближней зоне и частотных электромагнитных зондирований. Аппаратура 1-го и 2-го поколений использовала в качестве датчиков магнитных компонент ЭМ-поля кварцевые вариометры, что существенно ограничивало частотный диапазон измерений (со стороны высоких частот). Аппаратура была практически не пригодна для поисков рудных объектов.

Существенный прогресс был достигнут в начале 80-х годов прошлого столетия с созданием аппаратуры 3-го поколения. Главной особенностью этой аппаратуры было наличие бортового персонального компьютера, который не только тестировал аппаратуру и выполнял запись на твердотельный носитель, но и позволял производить обработку данных в полевых условиях. Другим существенным шагом вперед было применение индукционных катушек в качестве датчиков магнитных компонент поля. Еще одним преимуществом являлась способность выполнять работы по системе с удаленной базовой точкой, что существенно повышало качество полевых материалов. В то же время аппаратура была достаточно громоздкой, обладала значительным весом и энергопотреблением. 4-е поколение аппаратуры было создано в конце 80-х годов прошлого столетия и воплотило в себе все лучшие черты предыдущего поколения. В то же время аппаратура стала относительно малогабаритной и переносной. В состав аппаратуры входил 16-разрядный цифровой регистратор, имеющий 8–16 каналов, вмонтированный компьютер, водонепроницаемую клавиатуру и дисплей. Выносные усилители, соединенные кабелями с регистратором, обеспечивали предварительное усиление ЭМ-сигнала. 5-е поколение многофункциональной аппаратуры было внедрено в практику полевых работ на рубеже столетий. Благодаря высоким технологическим свойствам, несколько тысяч приборов этого поколения успешно используются по всему миру по сей день. Отличительными чертами этого поколения аппаратуры являются: малые размеры, малый вес (менее 5 кг), 24-разрядный аналого-цифровой преобразова-

тель, высокоэффективные цифровые фильтры помех, регистрация сигнала на съемную твердотельную память и малое энергопотребление (6–10 Вт).

Развитие и миниатюризация электронной элементной базы сделали возможным приступить к созданию многофункциональной аппаратуры, реализующей в одном приборе, казалось, ранее не совместимые функции, как, например, методы МТЗ и ВЭЗ. Многофункциональные 4- и 8-канальные приемники «Гепард» показаны на рис. 1а и 1в. Приборы имеют высокую чувствительность, очень малый уровень собственных шумов (менее 0,1 мкВ), очень широкий частотный диапазон (50000–0,0001 Гц). Электронная структура приемников включает в себя все элементы, характерные для 5-го поколения многофункциональной аппаратуры: коммуникационная плата, аналоговые усилители на каждый канал, 24-разрядный аналого-цифровой преобразователь, плата основного процессора, плата синхронизации, калибровочная плата, интернет-плата, SD-карт ридер/райтер, сенсорный экран, выполняющий роль дисплея и клавиатуры. Дополнительно каждый канал имеет плату фильтров, на который установлены режекторные фильтры первой гармоники промышленной частоты (50/60 Гц), а также четных и нечетных гармоник этой частоты, попадающих в частотный диапазон прибора. На плате также установлены переключаемые фильтры верхних и нижних частот. Усиленная аналоговая фильтрация позволяет использовать прибор в городских условиях, на территории работающих горных предприятий и вблизи мощных линий электропередач. Еще одной отличительной особенностью прибора является гибкая конфигурация каналов. То есть каждый канал может работать как электрический и как магнитный. Электронное переключение производится с экрана прибора. Удобный интерфейс позволяет выбрать применяемый метод и параметры регистрации электромагнитного поля с дисплея прибора или записать их в полевом лагере на SD-карточку с помощью персонального компьютера. Такое устройство прибора и программного обеспечения к нему позволяет экономически и геологически эффективно реализовать практически все наземные и подводные геофизические методы (исключая георадар).



Рис. 1. Многофункциональная геофизическая ЭМ-аппаратура: а) 4-канальный GEPARD-4A; б) многофункциональный геофизический источник тока AT-100; в) 8-канальный GEPARD-8A

Для реализации методов, использующих искусственное электромагнитное поле, приборы «Гепард» комплектуются переносным, широкодиапазонным геофизическим генератором тока AT-100 (рис. 1б). Генератор имеет мощность 100 Вт, питается от батареи 12 В и может подать в нагрузку (электрическая линия, незаземленная петля) стабилизированный ток 0,001–1,0 А. Частотный диапазон генератора составляет 50000–0,001. Частотный ряд заполняется очень плотно последовательным умножением на 2n базовых частот: 1,00-1,22-1,33-1,50-1,66 Гц. Данная особенность генератора позволяет получать детальные амплитудные и фазовые кривые в методах частотных зондирова-

ний, спектрального ВП, CSAMT и других. Режим работы генератора может задаваться с дисплея или записываться с помощью ПК на съемную SD-карту.

2. Датчики магнитного и электрического поля и полевые принадлежности

Датчиками магнитных компонент электромагнитного поля являются: для АМТ диапазона индукционный датчик AMS-15 (частотный диапазон 50000–1 Гц), для МТЗ-диапазона датчик AMS-37 (диапазон 500–0,0001 Гц). Внешний вид датчиков показан на рис. 2. Каждый датчик имеет магнитный сердечник, секционированную медную катушку, экран электрического поля, малошумящий предусилитель и калибровочную обмотку. Для полевых измерений датчики могут закапываться или забуриваться в землю.



Рис. 2. Индукционные магнитные датчики: а) AMS-15; б) AMS-37

Для высокопроизводительной, всесезонной установки датчиков на любом грунте предпочтительней использовать специальные прецизионные треноги (рис. 3). Треноги выпускаются 3 видов: вертикальные, горизонтальные и наиболее эффективные – трехосные. Треноги легко и быстро переводятся из транспортного положения в рабочее и обратно. Индукционные датчики хранятся в треногах как во время измерений, так и во время транспортировки. Для удобной транспортировки треног они комплектуются специальными сумками, рюкзаками и станинами. Применение треног позволяет обеспечить высокую точность установки магнитных датчиков в любое время года и на любом грунте, термостабилизировать индукционные датчики, а также существенно (в 2–3 раза) повысить производительность полевых работ.

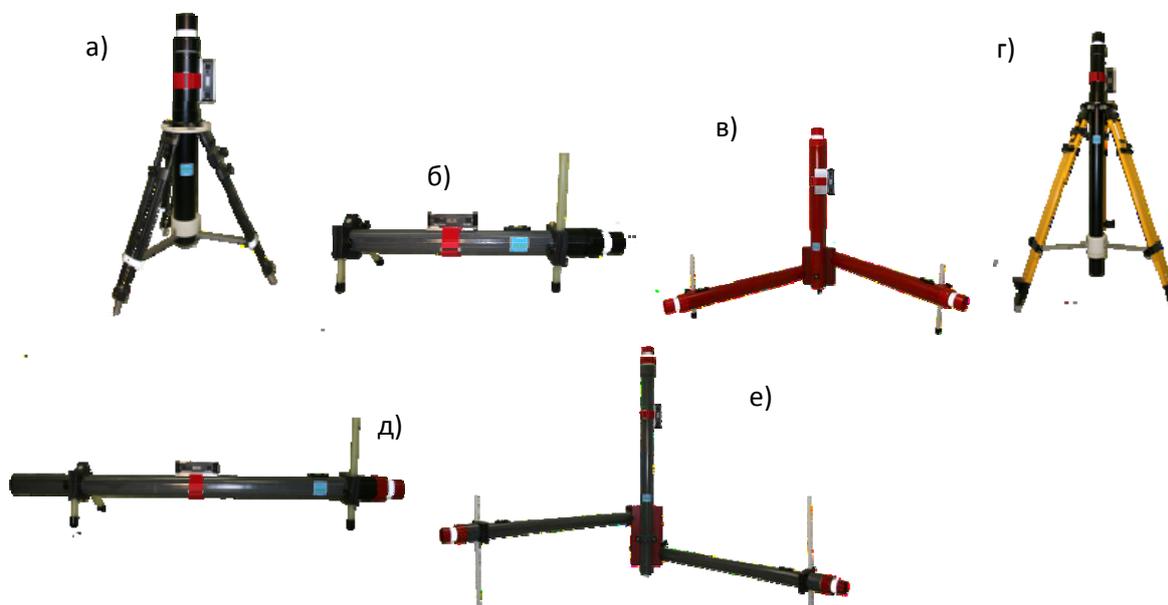


Рис. 3. Прецизионные полевые треноги для индукционных магнитных датчиков: а) TRI-1/30; б) TRI-1/30/1; в) TRI-3/30; г) TRI-1/50/1; д) TRI-1/50; е) TRI-3/50

В качестве датчиков электрических компонент поля используются электрические линии длиной 1–100 м, выполненные из гибкого многожильного экранированного про-

вода. В зависимости от используемого метода, заземление линий осуществляется стальными, латунными или пористыми неполяризуемыми электродами. Аппаратура комплектуется пористыми электродами трех видов (рис. 4): на медной, свинцовой и серебряной основе.



Рис. 4. Малошумящие неполяризуемые электроды:
 а) ACE-84 (медный); б) ALCE-84A (свинцовый); в) ASCE-84AG (серебряный)

Самыми стабильными, малошумящими являются серебряные электроды. Однако эти электроды также и самые дорогие в производстве. Каждый электрод состоит из пористой мембраны определенной формы, обладающей большой контактной поверхностью, герметичного цилиндра, металлического стержня с контактным проводом. Внутреннее пространство цилиндра заполнено специальным гелем, содержащим соль металла.

На рис. 5 показан пример выполнения 4-канальной аппаратурой «Гепард» детальных полевых работ методом магнитовариационного профилирования (МВП). В качестве датчиков магнитных компонент поля используются индукционные катушки AMS-15, катушки устанавливаются в трехосных прецизионных треногах (Hx, Hy, Hz) и вертикальных одноосных (Hz). 4-канальная конфигурация прибора позволяет выполнять регистрацию поля в двух точках одновременно.



Рис. 5. Применение многофункциональной ЭМ-системы при полевых работах методом МВП

Выводы

Разработана и выпускается многофункциональная система регистрации электромагнитных полей поколения 5+. Система позволяет реализовать на практике коммерчески и геологически эффективно практически все наземные и подводные электроразведочные методы, исключая георадар. Система состоит из 4- или 8-канальных многофункциональных регистраторов, широкодиапазонного генератора, датчиков электрических магнитных компонент поля, треног для установки магнитных датчиков поля и вспомогательного оборудования.

Библиографический список

1. Fox L. Recent trends in electroprospecting hardware and software development // Notes of the (St. Petersburg) Mining Institute. – 2005. – № 162. – P. 9–14.
2. Fox L. Fifth generation of multifunctional equipment – ten years in the market // The 19th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Abstracts. – Beijing, 2008. – Vol. 1. – P. 432–436.
3. Ingerov I. Method of multifrequency magnetovariational profiling (MVP) // EMS-2011. Abstracts. – St. Petersburg, 2011. – Vol. 2. – P. 449–454.
4. Ingerov O. Application of electroprospecting for hydrocarbon exploration // Notes of the (St. Petersburg) Mining Institute. – 2005. – № 162. – P. 15–25.
5. Ingerov O. Current trends in the development of electroprospecting hardware set for ground and marine surveys // EMS-2011. Abstracts. St. Petersburg, 2011. – Vol. 1. – P. 86–101.



УДК 550.837

Ж. Г. Ингтем¹, В. И. Дмитриев²

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Аннотация. *Обработка данных электромагнитных зондирований не всегда позволяет провести четкую интерпретацию полученного результата. Такая ситуация часто оказывается вызванной близким расположением нескольких неоднородностей или ситуацией, когда неоднородности расположены на разных глубинах или имеют разную проводимость и т. д. и т. п. Использование дифференциальных методов электроразведки при поиске полезных ископаемых позволяет повысить разрешающую способность методов интерпретации. Данная работа посвящена использованию метода интегрального сплайна в обработке данных электромагнитных зондирований.*

Ключевые слова: *численное дифференцирование, интегральный сплайн, магнитотеллурическое зондирование.*

Об авторах:

¹ К. ф.-м. н., Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, e-mail: j-g.ingtem@cs.msu.ru.

² Д. ф.-м. н., профессор, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, e-mail: dmitriev@cs.msu.ru.

J. G. Ingtem, V. I. Dmitriev

**USING METHODS OF NUMERICAL DIFFERENTIATION
FOR PROCESSING ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS
GEOPHYSICAL DATA FOR THE PURPOSE OF RAISING
THE RESOLUTION**

Abstract. *When inhomogeneities are located close to each other, or are on different depth, or have different conductivities etc... it is difficult to obtain a clear interpretation of MT data. The application of differential methods in electrical prospecting of mineral resources allows to increase the resolving power for the interpretation. This work is focused on the application of the integral form of spline function in the treatment of electromagnetic sounding data.*

Keywords: *numerical differentiation, integral form of the spline function, magnetotelluric sounding.*

Целесообразность методов численного дифференцирования в обработке данных электромагнитных зондирований обуславливается тем, что незаметные изменения функции могут быть более четко подтверждены её производной, т. е. использование производных позволяет выделить с хорошей точностью области, где расположена неоднородность. Интегральный сплайн позволяет как сглаживать геофизические данные, полученные с погрешностью, так и одновременно вычислять производную исследуемого процесса. Для того чтобы выделить с хорошей точностью области, где расположена неоднородность, необходимо не только исследовать поведение самого интегрального сплайна, построенного по полученным геофизическим данным, но также исследовать поведение его первой и второй производных. Построение интегрального сплайна заключается в определении сплайна n -й степени $-S(x)$ через его производную n -го порядка $-P(x)$, которая считается кусочно-постоянной функцией. Исходя из того, что для определения расположения неоднородности достаточно исследовать поведение производных до второго порядка включительно, можно ограничиться построением интегрального сплайна второй степени.

Для построения интегрального сплайна второй степени решается следующая задача:

$$\begin{cases} \frac{d^2 S(x)}{dx^2} = P(x), x \in [0, l] \\ S(x=0) = S^0; \left. \frac{dS}{dx} \right|_{x=0} = S' \\ \min_{\bar{v}} \sum_{n=0}^N (S(x^{(n)}, \bar{v}) - \tilde{f}_n)^2 \end{cases} \quad (1)$$

где \tilde{f}_n – измеренные значения в точках $x^{(n)}$, l – длина отрезка, на котором производились измерения и, соответственно, строится сплайн, N – количество измеренных значений, $P(x)$ – вторая производная сплайна – предполагается кусочно-постоянной функцией на сетке построения сплайна $\{x_k = kh\}$, $h = l/K$ – шаг сетки, $k \in [0, K]$ (сетка измерений и сетка построения сплайна могут не совпадать; желательно, чтобы сетка измерений была мельче сетки построения сплайна); $P(x) = P_k$ при $x \in [x_{k-1}, x_k]$, $k \in [1, K]$, где K – количе-

ство разбиений сетки построения сплайна; для построения интегрального сплайна необходимо найти значения $S^0, S', P_1, P_2, \dots, P_K$. Обозначим через $\bar{v} = \{S^0, S', P_1, P_2, \dots, P_K\}$ вектор искомых параметров. Интегральный сплайн $S(x)$ зависит от $K + 2$ параметров вектора \bar{v} . Если количество измерений больше, чем количество параметров, т. е. $N > K + 2$, то вектор параметров \bar{v} определяется однозначно и, следовательно, существует единственный интегральный сплайн, аппроксимирующий заданные значения. Если $N \leq K + 2$, то \bar{v} определяется неустойчиво и требуется стабилизировать задачу минимизации с помощью стабилизатора $\Omega(P) = \sum_{k=1}^{K-1} (P_{k+1} - P_k)^2$ для подавления сильных отклонений второй производной.

В соответствии с теорией регуляризации, минимизация стабилизирующего функционала $\min_{\bar{v}} \left\{ \sum_{n=0}^N (S(x^{(n)}, \bar{v}) - \bar{f}_n)^2 + \alpha \sum_{k=1}^{K-1} (P_{k+1} - P_k)^2 \right\}$ (где α параметр регуляризации, зависящий от погрешности измерения \bar{f}_n) позволяет устойчиво определять вектор параметров \bar{v} и, следовательно, устойчиво построить интегральный сплайн $S(x)$. Первая производная интегрального сплайна является кусочно-линейной, а вторая – кусочно-постоянной. Для того чтобы иметь гладкое представление первой и второй производных, необходимо построить интегральный сплайн по полученным значениям этих производных, взятых в серединах отрезков $[x_{k-1}, x_k]$, $k \in [1, K]$.

Вычислительный эксперимент на модели МТ-полей в двумерных неоднородных средах проводился следующим образом:

- расчет кажущегося сопротивления для неоднородной среды при фиксированной частоте в зависимости от x на земной поверхности;
- внесение погрешностей в кажущееся сопротивление случайным образом;
- вычисление $\frac{d\rho_k}{dx}$ и $\frac{d^2\rho_k}{dx^2}$ с помощью интегрального сплайна и их анализ.

На рис. 1 приведены графики профильных кривых $\rho_k(x)$, $\rho'_k(x)$ и $\rho''_k(x)$ при $\frac{\lambda_1}{h_1} = 1024$ для случая двух неоднородностей, находящихся в двухслойной среде $h_1 = 1$; $\sigma_1 = 1$; $\sigma_2 = 0,01$. Проводимость неоднородностей $\sigma_n = 10$, их глубина залегания $z = 2$, неоднородности расположены при $x \in [34; 37,5]$ и $x \in [38,5; 42]$, т. е. расстояние между неоднородностями $l = 1$. Погрешность в ρ_k равна 5 % от среднего аномалии ρ_k . Из рис. 1а видно, что по ρ_k различить аномалии от каждого тела практически невозможно (точками показаны неточные данные). Первая производная (рис. 1б) уже разделяет неоднородности, а вторая производная (рис. 1в) даёт чёткое положение каждой неоднородности (жирные горизонтальные отрезки обозначают расположение неоднородностей по оси, но никак не связаны с глубиной из-за масштаба).

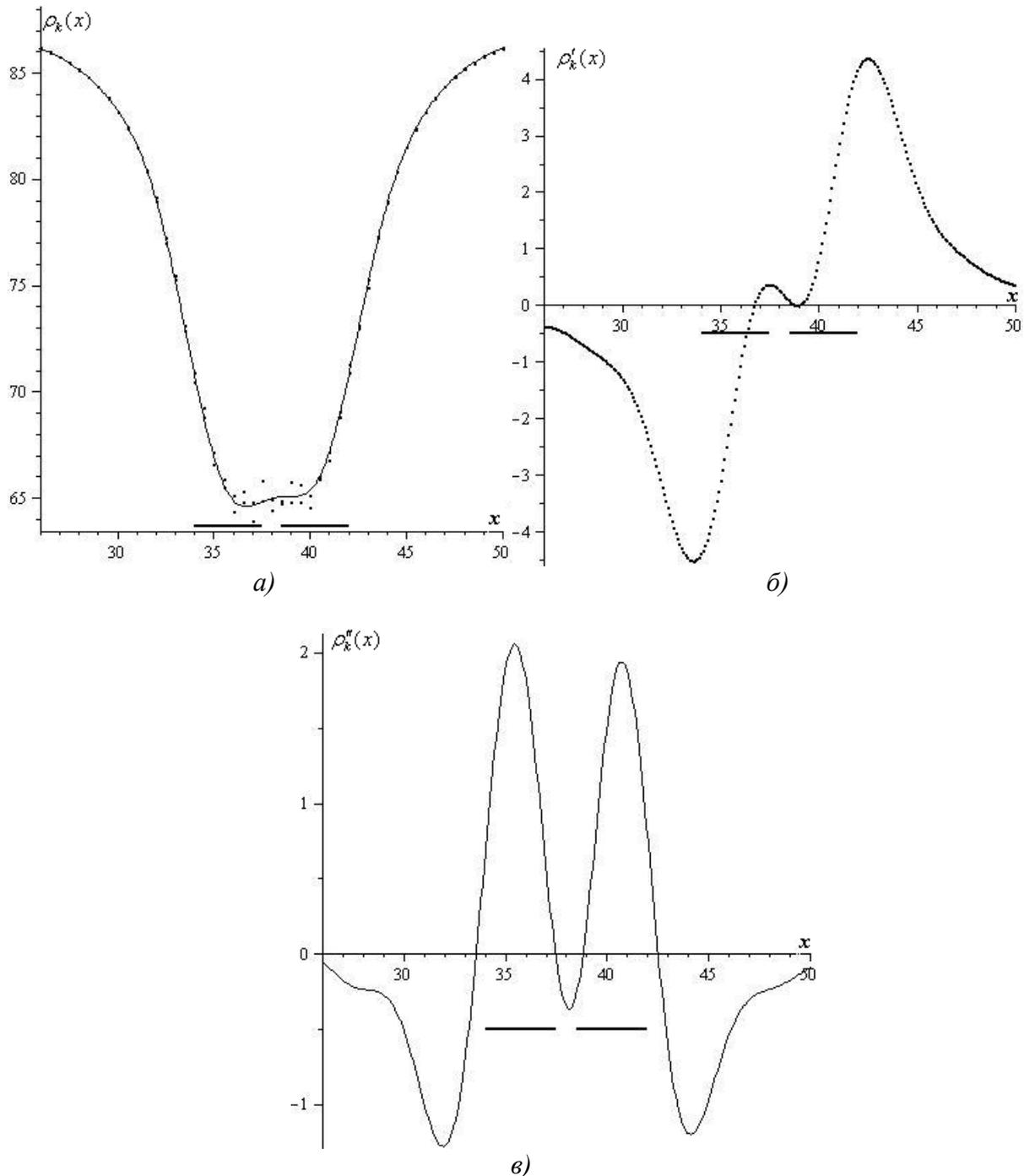


Рис. 6. Пример разделения аномалий от двух тел

На рис. 2 приведены результаты для тех же двух неоднородностей, но расположенных на разных глубинах ($z = 2$ для первой неоднородности, $z = 3$ для второй неоднородности). Погрешность 1 %. Частотный параметр $\frac{\lambda_1}{h_1} = 2048$. В этом случае кажущееся сопротивление практически не чувствует вторую неоднородность (рис. 2а). В то время как вторая производная (рис. 2в) чётко выделяет два тела (аномалия от второго тела в два раза меньше аномалии от первого тела). Следовательно, можно определить не только расположение тел, но и их глубину.

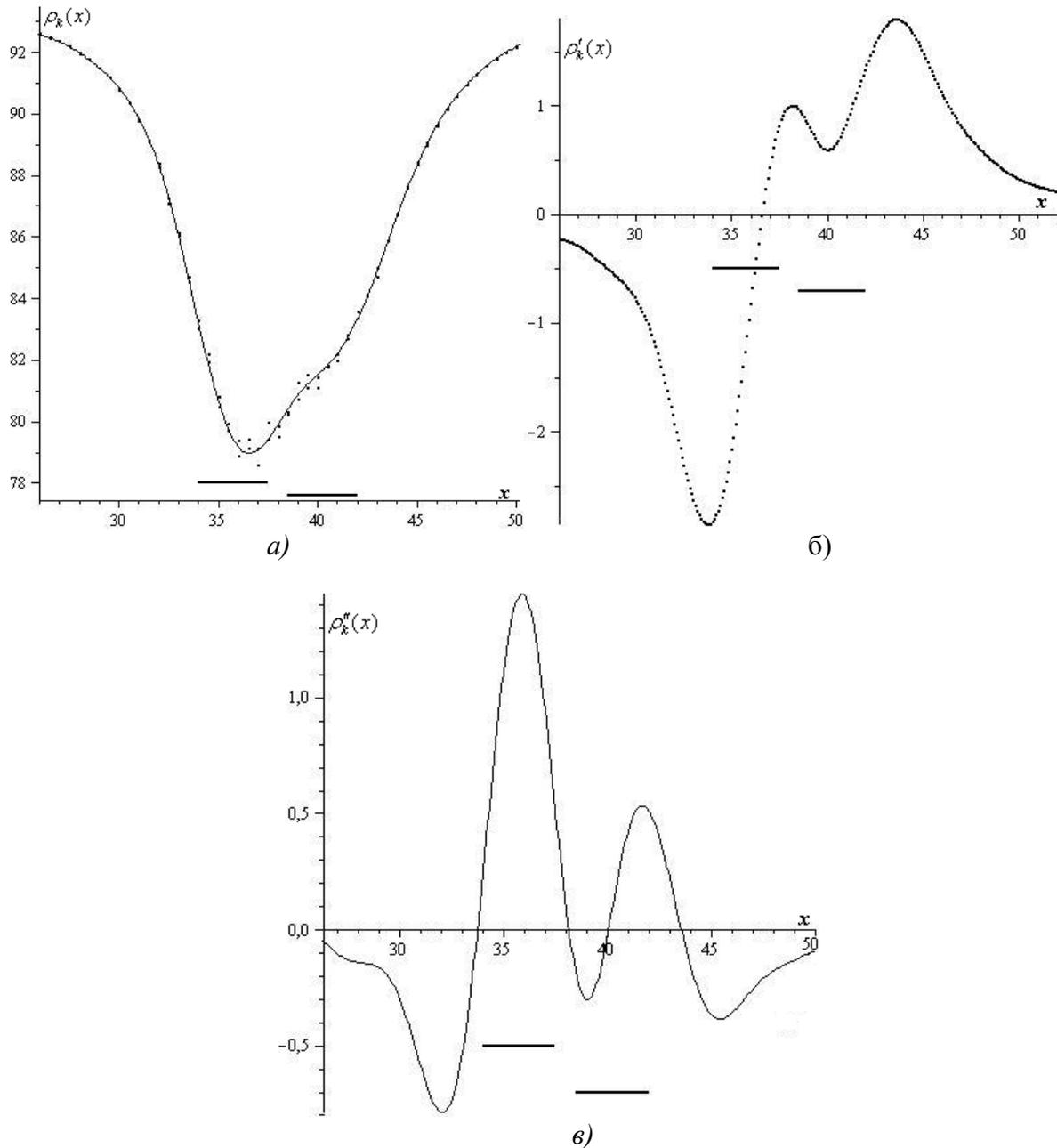


Рис. 2. Пример разделения аномалий от двух тел на разных глубинах

Полученный результат показывает эффективность применения численного дифференцирования профильных кривых для повышения разрешающей способности МТЗ при выделении особенностей строения среды вдоль земной поверхности.

Библиографический список

1. Дмитриев В. И., Мерцикова Н. А. Использование дифференциальных характеристик магнитного поля при решении обратной задачи электромагнитного зондирования двумерно-неоднородных сред // Физика Земли. – 1991. – № 6. – С. 59–64.
2. Dmitriev V. I., Dmitrieva I. V., Ingtem J. G. Integral form of the spline function in approximation problems // Computational Mathematics and Modeling, Consultants Bureau (United States). – 2013. – Т. 24. – № 4. – С. 488–497.



УДК 551.463.7, 530.16

*С. М. Коротаев¹, Н. М. Буднев², В. О. Сердюк¹, Е. О. Киктенко¹,
Ю. В. Горохов³*

ГЛУБОКОВОДНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ В БАЙКАЛЕ – КЛАССИЧЕСКИЙ И НЕКЛАССИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ¹

Аннотация. С 2003 г. в Байкале ведется эксперимент по мониторингу E_z на базе поверхность – дно. Исследованы эффект и предвестники близкого землетрясения, вариации полных потоков течений, вариации тока замыкания глобальной электрической цепи в проводящей Земле. С 2012 г. поставлены также измерения квантовых нелокальных корреляций. На их основе продемонстрирована возможность прогноза процессов с большой случайной составляющей, в частности удаленного землетрясения.

Ключевые слова: Байкал, мониторинг, взаимодействие геосфер, квантовая информация, прогноз.

Об авторах:

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН, Троицк.

² НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск.

³ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Троицк.

S. M. Korotaev, N. M. Budnev, V. O. Serdyuk, E. O. Kiktenko, J. V. Gorohov

DEEP-SEA ELECTROMAGNETIC MONITORING IN THE BAIKAL: CLASSICAL AND NONCLASSICAL ASPECTS

Abstract. The experiment on monitoring of E_z on the surface-floor baseline has been carried out in the Baikal since 2003. The effect and precursors of a close earthquake, variations of the water transport, and variations of the global electric circuit closure current in the conducting Earth have been studied. The measurements of quantum nonlocal correlations have also been performed since 2012. On their base the possibility of the forecast of the processes with big random component, in particular, a distant earthquake has been demonstrated.

Keywords: Baikal, monitoring, geospheres interaction, quantum information, forecast.

Введение

Электромагнитное поле гидросферы может быть использовано для мониторинга процессов-источников в самой гидросфере, литосфере и атмосфере. Однако в общем случае этому препятствует магнитотеллурическая помеха. Только вертикальная компонента электрического поля E_z может быть свободна от этой помехи и представляет для задач мониторинга особый интерес. Сразу в нескольких отношениях наиболее благоприятные условия для мониторинга E_z имеются в озере Байкал.

С 2003 года в юго-западной части озера на Байкальской глубоководной нейтринной обсерватории ведется эксперимент по мониторингу вертикальной компоненты электрического поля E_z на базе поверхность – дно. Эксперимент не имеет аналогов в практике морских электромагнитных исследований как по величине вертикальной базы, так и по длительности. Точка измерений избрана в 10 км от берега при глубине места 1367 м (51°.721 N, 104°.416 E). Выбор точки наблюдений диктовался требованием отсутствия

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 14-45-04053 и 15-05-00609).

вертикальной компоненты теллурического поля в соответствии с результатами математического моделирования [1]. Первоначальной целью эксперимента было изучение эффектов землетрясений в электрическом поле и полях, индуцированных течениями. В ходе эксперимента были обнаружены длиннопериодные вариации поля, связанные с вариациями тока глобальной электрической цепи (ГЭЦ), и их исследование также вошло в дальнейшую программу. Однако недостаточная точность и надежность измерительной установки сдерживала прогресс в интерпретации измерений. В 2012 г. в том же месте была развернута новая глубоководная установка, обеспечивающая, наряду с высокой точностью измерений, контроль помехообразующих факторов. Кроме того, новая установка позволила скомплексировать классический электродинамический эксперимент с квантовым экспериментом по измерению макроскопических нелокальных корреляций. Эффект выхода нелокальных корреляций на макроуровень – предмет новейших исследований в физике квантовой информации (например, [2]), но геофизические приложения уже актуальны в связи с доказанной возможностью его использования для прогноза крупномасштабных процессов с большой случайной составляющей [3–8].

Мы даем вначале краткий обзор результатов исследований этого исследования до 2010 г., затем описание нового подхода к эксперименту и его техники, после чего представляем первые результаты мониторинга в этом новом подходе (с 2012 г.).

1. Предшествующий этап мониторинга (2003–2010 гг.)

Первая измерительная установка представляла собой вертикальную электрическую антенну, заземленную в воде с помощью слабополяризующихся свинцовых электродов, с разносом 1250 м (при глубине места 1367 м) и подводный блок электроники, рассчитанный на годовые циклы автономной работы. Полное описание техники и условий эксперимента приведено в работе [9]. По природным и техническим условиям поддержание непрерывной работы установки оказалось непростой задачей. В итоге было получено четыре серии измерений: 2003/2004 г., 2007/2008 г., 2008 г. (неполный год) и 2009/2010 г. Результаты опубликованы в работах [9–12], ниже приведем их краткую сводку в соответствии с источниками поля и задачами эксперимента.

Поле, индуцированное течениями. Эта составляющая наиболее проста для анализа, поскольку из-за крайней малости вертикальной компоненты тока E_z не зависит от геоэлектрического разреза и определяется только эдс индукции от средней по межэлектродной базе магнито-зональной компоненты скорости $\langle V_y \rangle$ в горизонтальной компоненте постоянного магнитного поля Земли B_x ($E_z = -\langle V_y \rangle B_x$). Это делает весьма привлекательным использование длиннобазовых измерений E_z для практически важной в гидрологии, но редко реализуемой из-за громоздкости реализации прямыми методами задачи мониторинга интегральной по вертикали скорости (полного потока). Наиболее энергичными течениями в Байкале являются синоптические, спектр которых случаен и занимает полосу периодов примерно от 2 до 10 суток. Единственным периодическим течением является инерционное, с теоретическим периодом определяемой широтой φ : $T_0 = 12^h / \sin \varphi$, в нашем случае $T_0 = 15,286$ ч. В действительности период должен быть несколько больше из-за гидродинамического сопротивления. В спектрах E_z всех годовых серий наблюдался как широкий синоптический, так и узкий инерционный максимумы. Относительная погрешность определения скорости по этим данным составляет около процента, что, по крайней мере, на порядок лучше точности прямых гидрологических методов. По расхождению упомянутого теоретического и фактического инерци-

онного периода ($T = 15,722$ ч) удалось легко получить трудно определяемый прямыми методами коэффициент турбулентного трения ($5,35 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$), затем коэффициент донного трения ($3,1 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$).

Отмечена межгодовая изменчивость поля течений, зависящая от средней метеорологической активности. Наиболее спокойной оказалась серия 2003/2004 г., наиболее активной – 2007/2008 г. Максимальные амплитуды определенной по E_z средней по вертикали скорости синоптических течений менялись от 2,78 см/с до 6,28 см/с.

Поле тока глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Хотя концепция ГЭЦ в планетарной геофизике общепринята, она экспериментально обоснована лишь наблюдениями в атмосфере. Обнаружению тока ГЭЦ в литосфере препятствует малость обусловленной им E_z , техническая трудность ее измерения и многочисленные помехи в неоднородной среде. В океане последние два препятствия отпадают, но первое усугубляется из-за высокой проводимости морской воды. В больших озерах условия однородности и достаточно высокого сопротивления среды выполняются, но глубина обычно недостаточна для реализации длиннобазовых высокочувствительных измерений. С другой стороны, геофизически наиболее благоприятны для обнаружения тока ГЭЦ зоны активных глубинных разломов, над которыми за счет эманации радона 222 наблюдается повышенная проводимость нижней атмосферы и можно ожидать плотности вертикального тока, значительно большей среднепланетарного значения [13]. Озеро Байкал, как самое глубокое, расположенное над активным рифтовым разломом, в наибольшей степени удовлетворяет этим требованиям. Мониторинг обнаружил вариации E_z с периодом около 100–160 суток, амплитуда которого на два порядка больше того, которое могло бы быть связано с течением. Эти периоды соответствуют перемежающимся (intermittent) колебаниям жесткой компоненты солнечного рентгеновского излучения (вариации Ригера) [14]. Рентгеновские вариации могут косвенным образом, через влияние на атмосферные процессы воздействовать на конвекционную составляющую тока ГЭЦ. Прямое сопоставление со спектрами солнечного рентгена подтвердило отождествление этой вариации E_z с вариацией Ригера.

В длиннопериодной области в целом ($T > 10$ сут) вклад поля течений несущественен, но амплитуды прямо зависят от среднегодовой метеорологической активности, (наибольшую корреляцию с E_z обнаруживают вариации атмосферного давления). Корреляция с потоком солнечного рентгеновского излучения меняется от года к году от 0,6 до 0,9, причем ее величина зависит от среднегодового уровня не солнечной, а метеорологической активности. Запаздывание этой корреляции меняется в диапазоне от нескольких до десятков суток. Это подтверждает сложный опосредованный механизм влияния солнечного рентгена на ток замыкания ГЭЦ.

Такой источник поля должен обладать заметной инерционностью. Это было проверено с помощью метода причинного анализа [6, 15]. Последний основан на вычислении для переменных X и Y шенноновских энтропий $S(X)$, $S(Y)$ и условных $S(X|Y)$, $S(Y|X)$ энтропий, функций независимости $i_{Y|X} = S(Y|X)/S(Y)$, $i_{X|Y} = S(X|Y)/S(X)$, $0 \leq i \leq 1$, и функции причинности $\gamma = i_{Y|X}/i_{X|Y}$, $0 \leq \gamma < \infty$. По определению X – причина, а Y – следствие, если $\gamma < 1$. И наоборот, Y – следствие, а X – причина, если $\gamma > 1$. Если τ – сдвиг времени Y относительно X , то принцип классической причинности формулируется как $\gamma < 1 \Rightarrow \tau > 0$, $\gamma > 1 \Rightarrow \tau < 0$, $\gamma \rightarrow 1 \Rightarrow \tau \rightarrow 0$. На рис. 1 показаны автокорреляционная функция r , функция автонеизависимости $i_{Y|X}$ и функция автопричинности γ (X – фиксированный центральный сегмент реализации, Y – сегмент, скользящий от ее начала к концу) по данным E_z 2007/2008 г. с низкочастотной фильтрацией $T > 10$ сут. Автокорреляционная функция соответствует процессу с большой случайной составляющей

и почти симметрична. Функция независимости, как известно, ведет себя, грубо говоря, обратно модулю корреляционной функции, что подтверждает ее вид на рис. 1. Однако функция причинности антисимметрична, причем $\tau < 0$ соответствует $\gamma > 1$; $\tau > 0$ соответствует $\gamma < 1$. Это отвечает тому, что процесс в ранние моменты времени в определенной степени является причиной по отношению к поздним моментам. Иными словами, несмотря на открытость системы, процесс в источнике обладает заметной инерционностью. Имеется характерная антисимметричная пара экстремумов γ при $|\tau| \approx 2$ сут. Следовательно, атмосферные источники, возбуждающие длиннопериодные вариации E_z имеют память порядка двух суток.

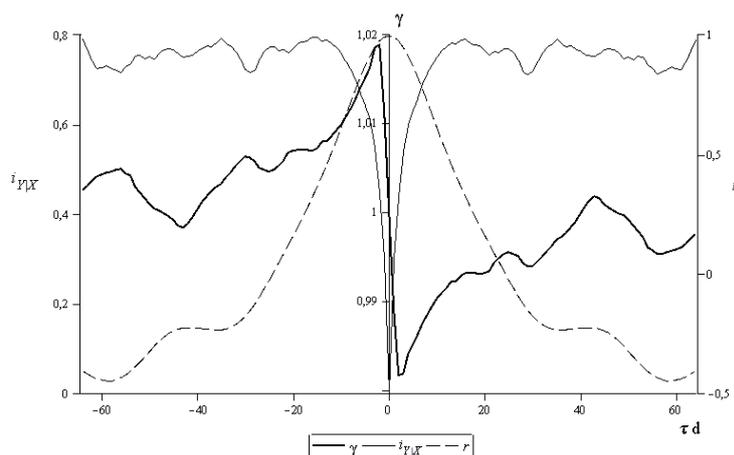


Рис. 1. Функции автопричинности γ , автонезависимости $i_{\gamma X}$ и автокорреляции r

Эффект и предвестники землетрясения. 27 августа 2008 г. в 1 ч 35 мин 30 с УТ произошло сильное землетрясение вблизи измерительной установки. Координаты эпицентра: широта 51.62° N; долгота 104.20° E. Глубина гипоцентра 17 км, магнитуда 6.4. Расстояние до эпицентра от установки 16.4 км. На рис. 2 показан график E_z в окрестностях времени землетрясения. Видно, что около полудня 26.08 началось быстрое усиление отрицательной E_z , которое продолжалось около 15 часов — до первого вступления землетрясения. Усиление поля заканчивается исключительно острым обособленным всплеском, являющимся непосредственным эффектом землетрясения. Полное увеличение напряженности составило 34 мкВ/м (в 6,4 раза выше фонового уровня). Из них 25 мкВ/м составляют итоговое предварительное увеличение и 9 мкВ/м — величину непосредственного эффекта. После землетрясения поле в течение 4 суток релаксировало к фоновому уровню. Наиболее вероятен фильтрационный (электрокинетический) механизм генерации 15-часового предвестника, связанный с фильтрацией подземных вод при изменении порового давления перед землетрясением. Преимуществом использования E_z над остальными компонентами электромагнитного поля является наивысшее отношение сигнал/шум, недостатком — сосредоточенность аномалии в зоне непосредственно над источником. В данном случае измерения выполнены в эпицентральной зоне, поэтому это условие выполнялось. Непосредственный эффект землетрясения обусловлен индукцией в гидродинамической волне (цунами), что дает при $E_z = 9$ мкВ/м оценку групповой скорости V_g около 50 см/с.

Хотя начало изменения поля, опережающее землетрясение на 15 часов, является его предвестником, для диагностики такого изменения в режиме реального времени требуется 5–6 часов. Поэтому практически достижимая заблаговременность не превы-

сит 10 часов. С целью поиска более ранних предвестников была изучена запись E_z за все предшествующее время. В результате накануне землетрясения были обнаружены необычные колебания, которые никогда ранее не наблюдались. В масштабе рис. 2 в предшествующие землетрясению 2–3 суток можно заметить «размытость» записи на некоторых участках. Подробный анализ [11] показал, что за трое суток до землетрясения начинают наблюдаться серии колебаний с периодом несколько минут. По мере приближения землетрясения амплитуда колебаний от серии к серии нарастает примерно от 1 до 2 мкВ/м. Поскольку вертикальная электродная база в месте ее установки полностью нечувствительна к теллурическому шуму, а гидродинамический шум имеет гораздо более длинные периоды, обнаруженное явление достоверно имеет тектоническую природу. Однако физический механизм генерации обнаруженных колебаний неясен.

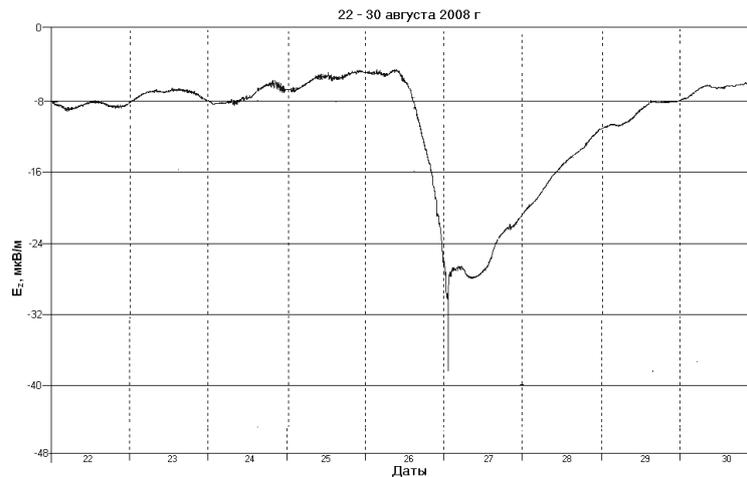


Рис. 2. E_z при землетрясении 27.08.2008. Его момент соответствует минимуму (пику) кривой

2. Новая экспериментальная установка, методика, состав и качество данных мониторинга (после 2012 г.)

Предшествующая техника и методика мониторинга имела слабые места, оправданные на ранней стадии, но потенциально опасные при интерпретации результатов или ограничивающие возможности исследования [8, 16]. Наиболее принципиальным недостатком являлась нестабильность собственных потенциалов электродов. Использовались простые свинцовые электроды. Хотя такие электроды традиционно считаются приемлемыми для пресной воды, даже минимальные изменения ионного состава или температуры могут вызвать изменения собственных потенциалов и вести к неконтролируемой помехе в измерении поля. Однако лишь замена электродов на высококачественные (потенциалы которых минимально зависят от изменчивости физико-химических параметров среды) не решает задачу до конца из-за неустраняемых спонтанных вариаций потенциалов. Последние носят характер фликкер-шума и на многомесячных периодах способны исказить измерения поля даже на длинных базах. С другой стороны, учитывая ответственность вывода об интерпретации многомесячных вариаций поля как проявления вариаций тока ГЭЦ, но не поля течений, требуется прямое сопоставление E_z с синхронными измерениями течений. Для решения этой диагностической задачи было бы достаточно измерения V_y , хотя бы на одном приповерхностном горизонте.

С учетом накопленного опыта была разработана новая глубоководная установка. Ее главными чертами являются снижение уровня всех возможных помех, повышение чувствительности и надежности за счет применения высококачественных слабополяризующихся электродов и системы контроля их собственных потенциалов.

Переходя к описанию методики эксперимента, отметим, что прямой контроль разности собственных потенциалов приповерхностного и придонного электродов невозможен. В нашей установке реализована идея косвенного контроля собственных потенциалов, основанная на индивидуальности реакции электродов на изменения окружающей среды и на корреляции разностей собственных потенциалов электродных пар, измеренных на верхнем и нижнем горизонтах с разностями собственных потенциалов пар, находящихся на разных горизонтах. Для этого на верхнем и нижнем горизонтах размещается по паре электродов с нулевой базой. Три канала измерений достаточны для получения разностей потенциалов всех шести возможных комбинаций электродов. Из них четыре представляют различные варианты измерения E_z . По каждой реализации рассчитываются их корреляции с разностями собственных потенциалов верхней и нижней пар и выбирается вариант с минимальными корреляциями. С другой стороны, спонтанные вариации собственных потенциалов электродов в высокостабильной среде представляют интерес сами по себе, поскольку стабилизированная от классических локальных воздействий электродная пара с нулевой базой работает как детектор макроскопических квантовых нелокальных корреляций. Водный слой Байкала представляет хорошую защиту от локальных воздействий. В частности, уже на глубине около 50 м термостатирование оказывается лучше достижимого в обычных лабораторных условиях.

На рис. 3 показана схема установки в окончательной конфигурации. Нижняя электродная пара помещена на глубине 1337 м (30 м над дном), верхняя – на глубине 47 м, таким образом, база измерений E_z составляет 1290 м. Каждая пара представляет два расположенных с практически нулевым разносом высококачественных морских слабополяризующихся метрологических $Ag-AgCl$ электрода ХД-5.519.00, выпущенных заводом «Эталон». Эти электроды были разработаны для прецизионных измерений постоянного электрического поля в море и являются лучшими в мире по нечувствительности собственных потенциалов к изменчивости физико-химических условий среды. Коммуникация электродов с блоком электроники осуществляется через несущий кабель-трос, покрытый снаружи герметичной пластиковой оболочкой, что исключает какие-либо искажения электрического поля и делает установку механически и электрически высоконадежной. Сигналы измеряются и записываются блоком электроники, размещенным на глубине 20 м. Дискретность записи данных 10 с. Результирующая относительная погрешность измерений не более 0,01 %. Кроме того, блок электроники содержит трехкомпонентный акселерометр для определения наклонов верхней части кабель-троса и измеритель температуры. В дальнейшем блок предполагается оснастить гидроакустической телеметрией для работы в режиме онлайн. Установка фиксируется тяжелым якорем на дне и притопленным бумом на глубине 15 м. Использование притопленного буя исключает влияние ветрового волнения и прочих гидрометеорологических явлений на поверхности озера на работу установки. Измерительная система рассчитана на автономный режим работы в течение не менее года.

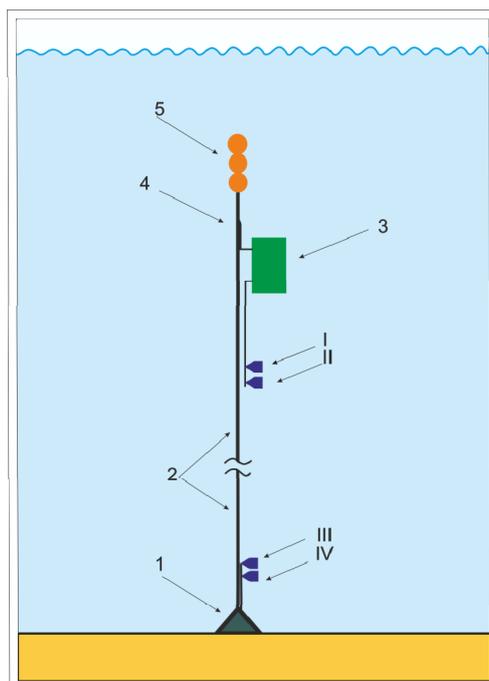


Рис. 3. Байкальская глубоководная установка: 1 – якорь; 2 – кабель-трос; 3 – блок электроники, датчики термометра и акселерометра; 4 – буйреп; 5 – буй; I, II – верхняя электродная пара; III, IV – нижняя электродная пара

Хотя в предыдущих исследованиях было установлено отсутствие в E_z теллурической составляющей, возросшая точность измерений делала желательной проверку этого факта по магнитным измерениям вблизи установки. С этой целью в ближайшей точке берега поставлен в режим непрерывной работы протонный магнитометр ММП-203 (ежеминутные измерения с передачей данных в Интернет).

Для анализа вклада полей течений в E_z в 2012–2014 использовались данные по прямым измерениям течений, выполнявшимся группой EWAG (Швейцария) на горизонте 20 м на нейтринном телескопе в 5 км в от нашей установки, а с 2014 ведутся собственные измерения на горизонте 100 м. Средняя скорость между горизонтами электродов (47 и 1337 м) заведомо меньше, поэтому можно разделить области спектра E_z , где поле течений преобладает над остальными, и наоборот, где оно пренебрежимо мало. В первом случае величина $V_y B_x$ должна превышать E_z , и только во втором она может быть меньше E_z .

Неклассическая часть программы эксперимента включает, во-первых, изучение нелокальных корреляций электродных детекторов на двух горизонтах в озере и удаленного на 4200 км лабораторного детектора в Троицке и, во-вторых, изучение корреляций сигналов детекторов с глобальными и региональными диссипативными случайными процессами. Из предыдущих экспериментов и теоретических оценок [2, 6–8, 20] известно, что доминирующими процессами-источниками являются солнечная и глобальная геомагнитная активность; региональные источники – макротурбулентность в деятельном слое Байкала и землетрясения вносят меньший вклад, но представляют в данном случае особый интерес.

Таким образом, получено три годовых серии наблюдений (2012/2013, 2013/2014, 2014/2015). Единственный технический сбой произошел в последней серии в канале измерения разности потенциалов нижней электродной пары.

Данные акселерометра показали, что электродная линия вертикальна с точностью порядка $0,1^\circ$. Сопоставление временных рядов температуры на глубине 20 м и разности

потенциалов верхней электродной пары (на глубине 47 м, температурный коэффициент 0,04 мВ/К) показало, что имеется запаздывающий отклик этой разности на вариацию температуры только на годовом периоде. Поэтому диапазон изучаемых вариаций E_z был ограничен периодами $T < 220$ сут. Отсутствие в E_z теллурической составляющей подтверждено нулевой (в пределах ошибок) когерентностью в спектрах E_z и магнитного поля. Убедившись, таким образом, в отсутствии возможных помех, перейдем к результатам, составлявшим цель эксперимента.

3. Классический аспект

Поле течений. Результаты сопоставления E_z с прямыми измерениями V_y на верхнем горизонте по всем трем годовым сериям близки. На рис. 4 представлены амплитудные спектры E_z и эдс $V_y B_x$, в диапазоне 10 часов – 10 суток, рассчитанной по измерениям вектора скорости на горизонте 20 м в точке, удаленной в сторону берега на 5 км, и известному значению горизонтальной компоненты магнитного поля $B_x = 19014$ нТл. Как было указано в предыдущем разделе, за счет большого превышения приповерхностной скорости V_y над средней по вертикали уровень амплитуд $V_y B_x$ значительно превышает уровень E_z , что и наблюдается на рис. 4.

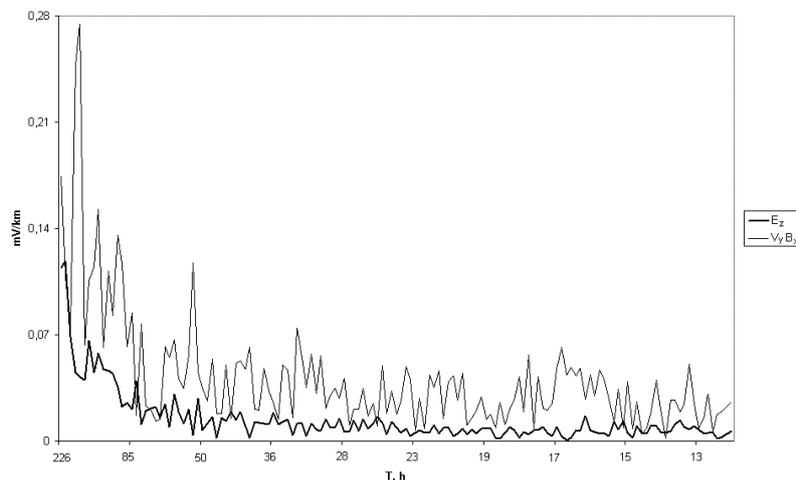


Рис. 4. Амплитудные спектры E_z и эдс $V_y B_x$, в диапазоне периодов 10 часов – 10 суток (2012/2013 г.)

Форма спектров подобна, слева в обоих хорошо виден синоптический максимум, хотя детального совпадения по условиям измерений нет. Инерционное течение в спектре E_z представлено небольшим, но характерным пиком на периоде $T = 15,722$ часа. Ему отвечает расщепленный (взаимодействием с многочисленными низкочастотными синоптическими спектральными линиями) максимум в $V_y B_x$. Эффект расщепления в E_z отсутствует из-за большей гладкости синоптического максимума E_z . Эта большая гладкость соответствует реакции E_z именно на среднюю скорость.

На рис. 5 представлены спектры в диапазоне от 10 до 220 суток. Видно, что в большей части диапазона уровни спектров примерно равны, а на периодах более двух месяцев амплитуды E_z значительно превышают $V_y B_x$. Это значит, что на периодах более 10 суток индуцированное течением поле незначительно по сравнению с полем других источников.

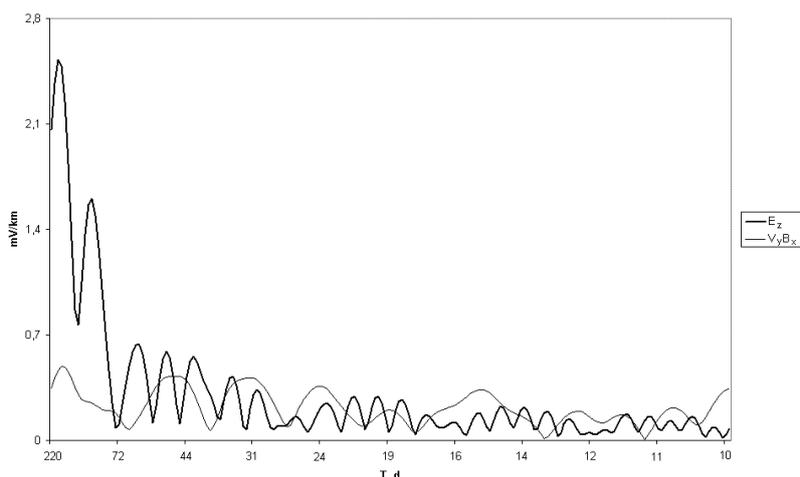


Рис. 5. Амплитудные спектры E_z и эдс $V_y B_x$ в диапазоне периодов 10–220 суток (2012/2013 г.)

Вариации тока ГЭЦ. Многомесячные максимумы в левой части спектра E_z на рис. 5 уверенно отождествляются с вариациями тока ГЭЦ, связанными с квазипериодами наиболее жесткой компоненты излучения Солнца [14]. Отождествление подтверждено спектральным анализом E_z и потока солнечного рентгеновского излучения XR . Кроме того, показано, что корреляция с XR выше корреляции с общей солнечной активностью, характеризуемой стандартным индексом радиоизлучения [8]. При этом очевидно, что прямого влияния XR на ток проводимости быть не может, влияние может быть только опосредованным воздействием на конвекционный ток в атмосфере. Это подтверждается существенно запаздывающим характером корреляции E_z с XR [8, 12]. Еще более убедительны результаты причинного анализа в области подобия спектров $T > 86$ сут, представленные на рис. 6. $\gamma > 1$ означает, что XR – причина по отношению к E_z . Максимум причинности $\gamma = 1,6$ и минимум независимости E_z от XR $i_{X|Y} = 0,30$ соответствуют запаздыванию E_z на 4 сут. При том же запаздывании наблюдается наибольшая корреляция ($r = -0,92 \pm 0,02$), но ее экстремум весьма плоский, что объясняет разброс оценок запаздывания по корреляционной функции [8, 12].

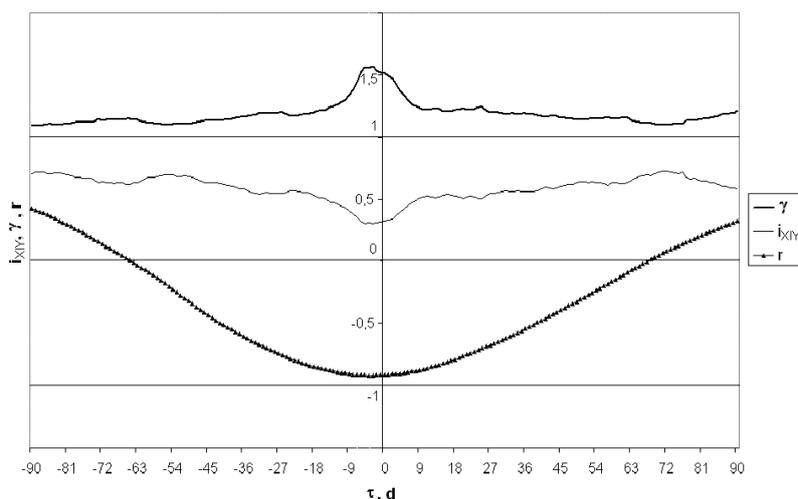


Рис. 6. Причинный и корреляционный анализ E_z (X) и XR (Y); τ – сдвиг времени Y относительно X , сут (2014/2015 г.)

4. Неклассический аспект

Согласно квантовому принципу слабой причинности, для неизвестных запутанных состояний (или, в других терминах, для случайных процессов) возможны опережающие нелокальные корреляции через времениподобный интервал. При диффузионном обмене запутанностью величина опережения (запаздывания) этих корреляций может быть велика. В серии работ, обобщенной в монографии [6], было теоретически и экспериментально показано, что нелокальные корреляции между двумя подсистемами характеризуются запаздывающим и опережающим максимумами, симметрия между которыми нарушается экранирующей средой, в большей степени подавляющей запаздывающий максимум. За счет интерференции может возникать также квазисинхронный максимум корреляции. Экспериментальная задача заключается в установлении корреляции между процессом-источником и полностью изолированным от классических локальных воздействий пробным процессом в детекторе. Наиболее надежным оказался детектор, основанный на спонтанных вариациях собственных потенциалов слабополяризующихся электродов в электролите [6, 17]. В результате предшествующих экспериментов выявлены нелокальные корреляции, с одной стороны, между удаленными детекторами и с другой – между ними и гелиогеофизическими диссипативными процессами с большой случайной компонентой. Доминирующими источниками оказались солнечная и глобальная геомагнитная активность. Нелокальная природа корреляций доказана нарушением неравенства типа Белла [3, 6]. Доказана возможность прогноза солнечной и геомагнитной активности на основе нелокальных корреляций [3–8]. Наиболее сильные макроскопические нелокальные корреляции наблюдаются на крайне низких частотах (на периодах несколько месяцев), что требует постановки длительных экспериментов в высокостабильных условиях. Таким образом, неклассический аспект Байкальского мониторинга касался одновременно проблем фундаментальной физики и геофизики.

Корреляции сигналов детекторов между собой. Обозначим U_b , U_t , U_l сигналы (разности собственных потенциалов) детекторов (электродных пар), расположенных на нижнем и верхнем горизонтах в Байкале и на удаленной наземной обсерватории в Троицке соответственно. В запутанных состояниях, если вариации сами по себе случайны, сигналы подчиняются квантовому принципу слабой причинности, нарушающему сформулированный выше принцип слабой причинности (например, возможно $\gamma > 1$ при $\tau > 0$). Значимым отклонением экспериментальной оценки γ от 1 считается ее превышение над относительной выборочной погрешностью (около 10 %).

На основе спектрального анализа выделен диапазон периодов наибольшей коррелированности всех сигналов $145 > T > 46$ сут. В этом диапазоне выявлена направленная сверху вниз (из-за доминирования гелиогеофизических процессов-источников) причинная связь сигналов $U_l \rightarrow U_t$, $U_l \rightarrow U_b$, $U_t \rightarrow U_b$ [7]. Эта связь характеризуется приблизительно симметричным запаздыванием и опережением, причем опережающая корреляция систематически больше запаздывающей. Пример ($U_l \rightarrow U_t$) показан на рис. 7. Помимо опережающего и запаздывающего максимумов γ виден квазисинхронный ($\tau \approx 0$) и соответствующие им минимумы $i_{X|Y}$. Главный максимум $\gamma = 1,4$ наблюдается при опережении $\tau = 29$ сут. Корреляционная функция отражает только линейную связь, поэтому положение ее экстремумов другое, но наибольшая корреляция $r = -0,87$ также опережающая, $\tau = 57$ сут.

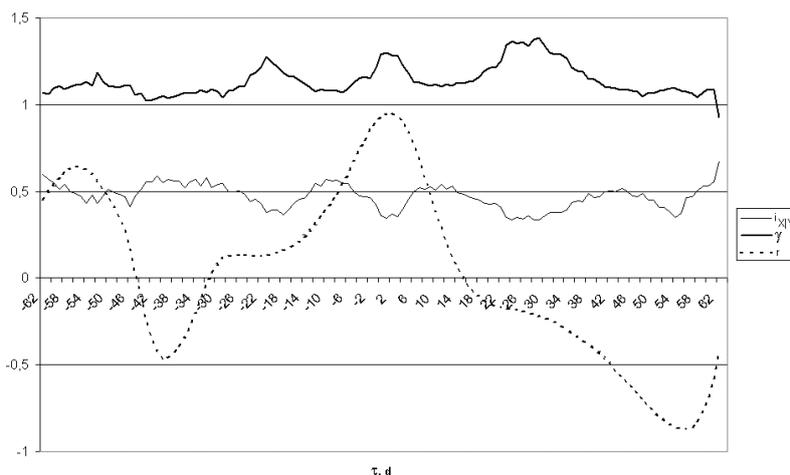


Рис. 7. Причинный и корреляционный анализ $U_t(X)$ и $U_l(Y)$: $\tau < 0$ соответствует запаздыванию U_t относительно U_l , $\tau > 0$ – опережению

В парах $U_t \rightarrow U_b$ и $U_l \rightarrow U_b$ также доминирует опережающая причинность, соответственно: $\gamma = 5,2$, $\tau = 21$ сут и $\gamma = 6,2$, $\tau = 24$ сут. Причинность наиболее выражена для пары детекторов с наибольшим вертикальным разнесом (U_l , U_b), но τ не аддитивно, поскольку связь нелокальна.

Установлена нелокальная связь сигнала U_t (на глубине 47 м) с температурой t в вышележащем деятельном слое (глубина измерения 20 м). Амплитуды спектральных максимумов U_t , коррелирующих с t , оказались на два порядка выше тех, которые могли бы быть обусловлены локальным воздействием согласно температурному коэффициенту данных электродов. Эта нелокальная связь оказалась причинной $t \rightarrow U_t$ и опережающей. В том же диапазоне периодов главный максимум $\gamma = 1,5$, минимум $i_{XY} = 0,24$ и $\max r = -0,97$ наблюдаются при опережении τ U_t относительно t 20 сут. Мы применили к этим данным прогностический алгоритм, основанный на вычислении текущей регрессии. Алгоритм требует длительного обучающего интервала, поэтому прогноз можно было проверить на остающемся относительно коротком отрезке ряда. Результат представлен на рис. 8.

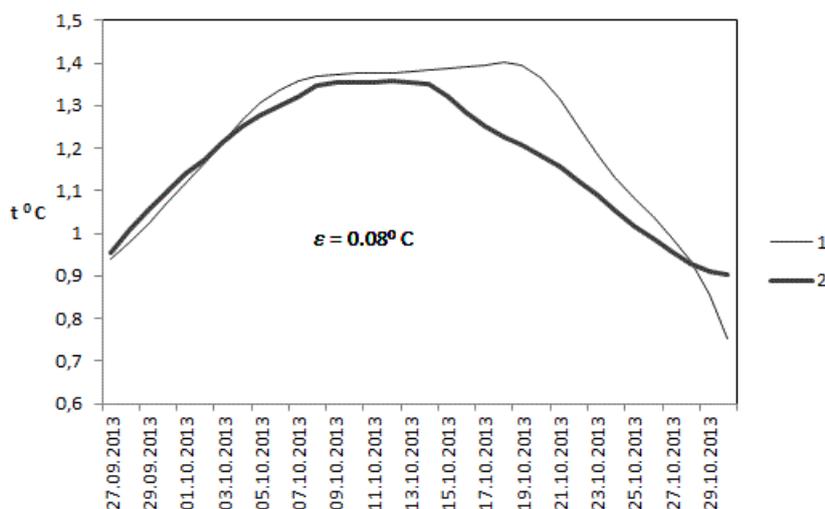


Рис. 8. Прогноз низкочастотной вариации температуры t с заблаговременностью 20 суток (1) в сопоставлении с фактической кривой t (2): ϵ – среднеквадратичная ошибка прогноза

За время эксперимента произошло одно относительно мощное землетрясение: $M = 5,6$, расстояние до эпицентра 890 км (Хакасия), глубина гипоцентра 15 км. В сигнале придонного детектора Ub это событие видно без всякой обработки (рис. 9) как единственное за весь год кратковременное возмущение в виде характерного тройного всплеска (опережающий-квазисинхронный-запаздывающий). Возмущение начинается примерно за 12 суток до землетрясения и достигает опережающего максимума за 6 суток. В Ut сигнал зашумлен близкими вышележащими процессами. В E_z ввиду большой удаленности очага отсутствуют какие-либо особенности в окрестностях события. Но возмущение в сигнале Ub практически свободно от шумов, его форма точно соответствует теоретическому предсказанию, а величина опережающего всплеска (2,7 мВ) не противоречит теоретической оценке согласно уравнению макроскопической запутанности [8]. Таким образом, макроскопические нелокальные корреляции могут быть использованы в прогнозе землетрясений.

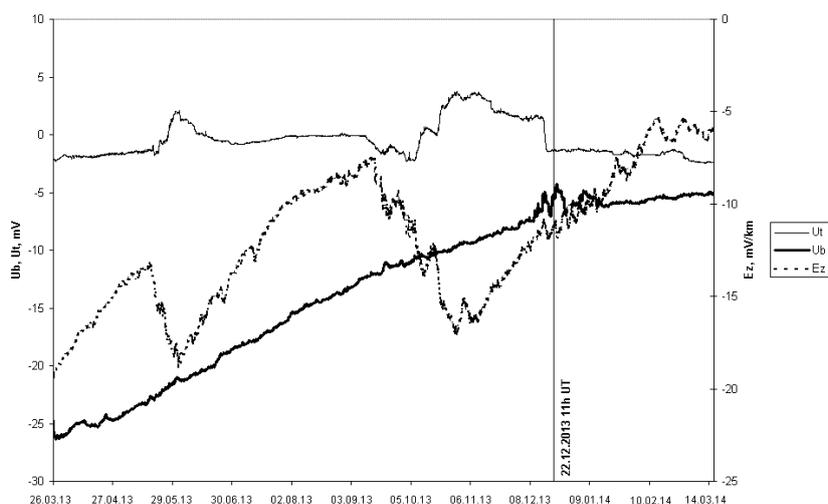


Рис. 9. Среднечасовые значения E_z , сигналов нижнего электродного детектора Ub и верхнего Ut : вертикальная черта – момент землетрясения

Заключение

Глубоководный мониторинг в Байкале несет точную информацию о полных потоках течений, дает уникальную возможность изучения вариаций поля на участке тока ГЭЦ над рифтовым разломом и принципиально позволяет вести систематическое прогнозирование процессов с большой случайной составляющей – гидродинамической и сейсмической активности.

Библиографический список

1. Pankratov O. V., Kuvshinov A. V., Avdeev A. B. Ez-response, as a monitor of Baikal rift fault electrical resistivity: 3-D-modeling studies // Annals of Geophysics. – 2004. – V. 47. – No 1. – P. 151–156.
2. Calsamiglia J., Hartmann L., Dür W., Briegel H.-J. Spin gases: quantum entanglement driven by classical kinematics // Phys. Rev. Lett. – 2005. – V. 95. – P. 180502.
3. Korotaev S. M. Experimental study of advanced correlation of some geophysical and astrophysical processes // Int. J. of Computing Anticipatory Systems. – 2006. – V. 17. – P. 61–76.
4. Коротаев С. М., Сердюк В. О., Горохов Ю. В. Прогноз геомагнитной и солнечной активности на основе нелокальных корреляций // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 415. – № 6. – С. 814–817.
5. Korotaev S. M., Serdyuk V. O. The forecast of fluctuating large-scale natural processes and macroscopic correlations effect // Int. J. of Computing Anticipatory Systems. – 2008. – V. 20. – P. 31–46.

6. Korotaev S. M. Causality and reversibility in irreversible time. – Scientific Research Publishing, Inc., USA, 2011. – 130 p.
7. Korotaev S. M., Serdyuk V. O., Kiktenko E. O., Budnev N. M., Gorohov J. V. Results of the Baikal experiment of observations of macroscopic nonlocal correlations in reverse time // Unified Field Mechanics. – London: World Scientific, 2015. – P. 366–373.
8. Коротаев С. М., Буднев Н. М., Сердюк В. О., Зурбанов В. Л., Миргазов Р. Р., Мачинин В. А., Киктенко Е. О., Бузин В. Б., Панфилов А. И. Новые результаты мониторинга вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал на базе поверхность-дно // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55. – № 3. – С. 406–418.
9. Шнеер В. С., Гайдаш С. П., Трофимов И. Л., Коротаев С. М., Кузнецова Т. В., Цирульник Л. Б., Панфилов А. И., Буднев Н. М., Миргазов Р. Р. Долговременные наблюдения вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал // Физика Земли. – 2007. – № 4. – С. 71–75.
10. Коротаев С. М., Гайдаш С. П., Шнеер В. С., Сердюк В. О., Буднев Н. М., Миргазов Р. Р., Бузин В. Б., Халезов А. А., Панфилов А. И. Межгодовая изменчивость вариаций вертикальной компоненты электрического поля в оз. Байкал // Физика Земли. – 2011. – № 2. – С. 74–80.
11. Коротаев С. М., Шнеер В. С., Гайдаш С. П., Буднев Н. М., Миргазов Р. Р., Халезов А. А., Панфилов А. И. Эффект и предвестники землетрясения 27.08.2008 в вертикальной компоненте электрического поля в озере Байкал // Доклады Академии наук. – 2011. – Т. 438. – № 5. – С. 683–686.
12. Коротаев С. М., Киктенко Е. О., Гайдаш С. П., Буднев Н. М., Миргазов Р. Р., Панфилов А. И., Халезов А. А., Сердюк В. О., Шнеер В. С. Связь вариаций вертикальной компоненты электрического поля в водной толще озера Байкал с солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53. – № 6. – С. 817–820.
13. Морозов В. Н., Шварц Я. М., Щукин Г. Г. Глобальная электрическая цепь: физико-математическое моделирование и регулярные измерения в нижней атмосфере // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. – М.: ОИФЗ, 2000. – С. 55–67.
14. Kuznetsova T. V., Tsurulnic L. V. Oscillations in the Sun-Earth system // Proc. the 4-th International Conference Problems of Geocosmos. – Vienna: Acad. of Sci., 2002. – P. 8–11.
15. Коротаев С. М. О возможности причинного анализа геофизических процессов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1992. – Т. 32. – № 1. – С. 27–33.
16. Коротаев С. М., Буднев Н. М., Сердюк В. О., Зурбанов В. Л., Миргазов Р. Р., Мачинин В. А., Киктенко Е. О., Бузин В. Б., Новыш А. В., Портянская И. А. Результаты мониторинга вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 148–157.
17. Коротаев С. М., Сердюк В. О., Сорокин М. О. Проявление макроскопической нелокальности в геомагнитных и солнечно-ионосферных процессах // Геомагнетизм и аэрономия. – 2000. – Т. 40. – № 3. – С. 56–64.



УДК 550.837

Ю. Ф. Мороз¹, С. Э. Смирнов²

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ: ПАРАТУНКА, КАКИОКИ И ИРКУТСК

Аннотация. Рассмотрены вековые вариации вертикального магнитного поля в obs. Паратунка (Петропавловск-Камчатский), Какиоки (о. Хонсю) и Иркутск с 1968 по 2014 г. Сравнительный анализ вековых ходов показал, что с 1968 по 1998 г. вековые хода подобны. В этот период проявилась интенсивная вариация напряжённостью в первые сотни нТл. Интересно, что в последующее время с 1998 по 2014 г. ситуация изменилась. В obs. Иркутск и Какиоки проявились вариации с периодом около 15 лет (возможно, период её ещё будет больше, так как вариация имеет продолжение). В то же время в obs. Паратунка вариация практически не выражена. Предполагаются причины этого явления. Не исключено, что на поведение вертикального магнитного поля оказали влияние крупные геоэлектрические неоднородности в верхней мантии, которые связываются с сильнейшими ($M = 7,4-7,7$) землетрясениями в районе Камчатки на глубинах около 600 км.

Ключевые слова: геомагнитное поле, вековые вариации, сила землетрясения.

Об авторах:

^{^1} Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский.

^{^2} Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, пос. Паратунка, Камчатский край.

Y. F. Moroz, S. E. Smirnov

FEATURES OF BEHAVIOUR OF SECULAR VARIATIONS OF THE VERTICAL COMPONENT OF THE GEOMAGNETIC FIELD ACCORDING TO MAGNETIC OBSERVATORIES: PARATUNKA, KAKIOKI AND IRKUTSK

Abstract. *We consider the secular variations of the vertical magnetic field in obs. Paratunka (Petropavlovsk-Kamchatsky), Kakioki (Honshu) and Irkutsk from 1968 to 2014. Comparative analysis of the secular trends showed that from 1968 to 1998 secular variations are similar. During this period, an intense variation of the first hundreds of nT tension was revealed. It is interesting that from 1998 to 2014 the situation has changed. In the obs. Irkutsk and Kakioki variations with a period of about 15 years were revealed (maybe period will be linger as a continuation of the variation). At the same time, in obs. Paratunka variation is almost not expressed. The presumed cause of this phenomenon is considered. It is possible that the behavior of the vertical magnetic field is influenced by large geoelectric inhomogeneities in the upper mantle, which bind to the strong ($M = 7,4-7,7$) earthquakes in the area of Kamchatka at a depth of about 600 km.*

Keywords: *geomagnetic field, secular variation, variation of the field strength, geoelectric heterogeneity of the mantle, earthquake strength.*

Вековые вариации представляют собой изменения средних годовых значений составляющих геомагнитного поля во времени. Вековой ход геомагнитного поля получается по данным магнитных обсерваторий, осуществляющих мониторинг геомагнитного поля очень длительное время. Результаты показывают, что вековой ход не остаётся постоянной величиной, а меняется во времени. Так как измерения в обсерваториях осуществляются на протяжении 100–150 лет, то во временном ходе могут быть выделены вариации с периодом в несколько десятков лет. Природа вариаций связывается преимущественно с внутриземными процессами, происходящими на границе нижней мантии и ядра.

Однако существуют представления, что в вариациях присутствует и внешнее поле, но вклад его крайне незначительный [3]. Важным вопросом геофизики является изучение вариаций векового хода и их возможной связи с глубинными геодинамическими процессами. В этой связи мы обратили внимание на поведение векового хода геомагнитного поля в обсерваториях, расположенных на материке (Иркутск), на острове Хонсю (Какиоки) и п-ове Камчатка (Паратунка) (рис. 1, 2).

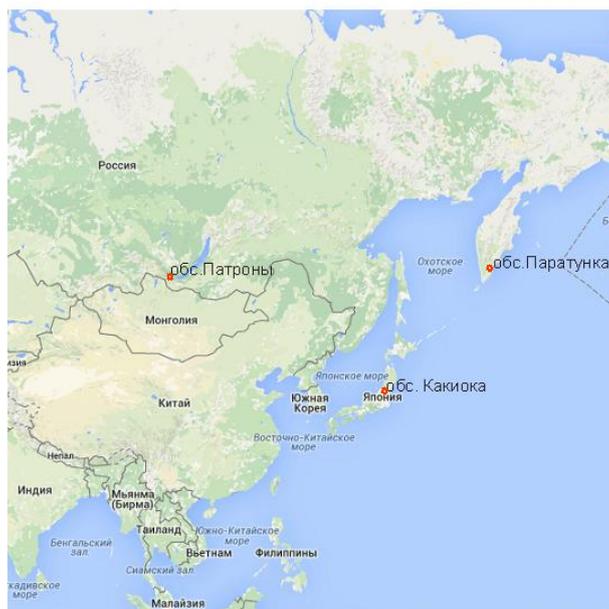


Рис. 1. Схема расположения геомагнитных обсерваторий

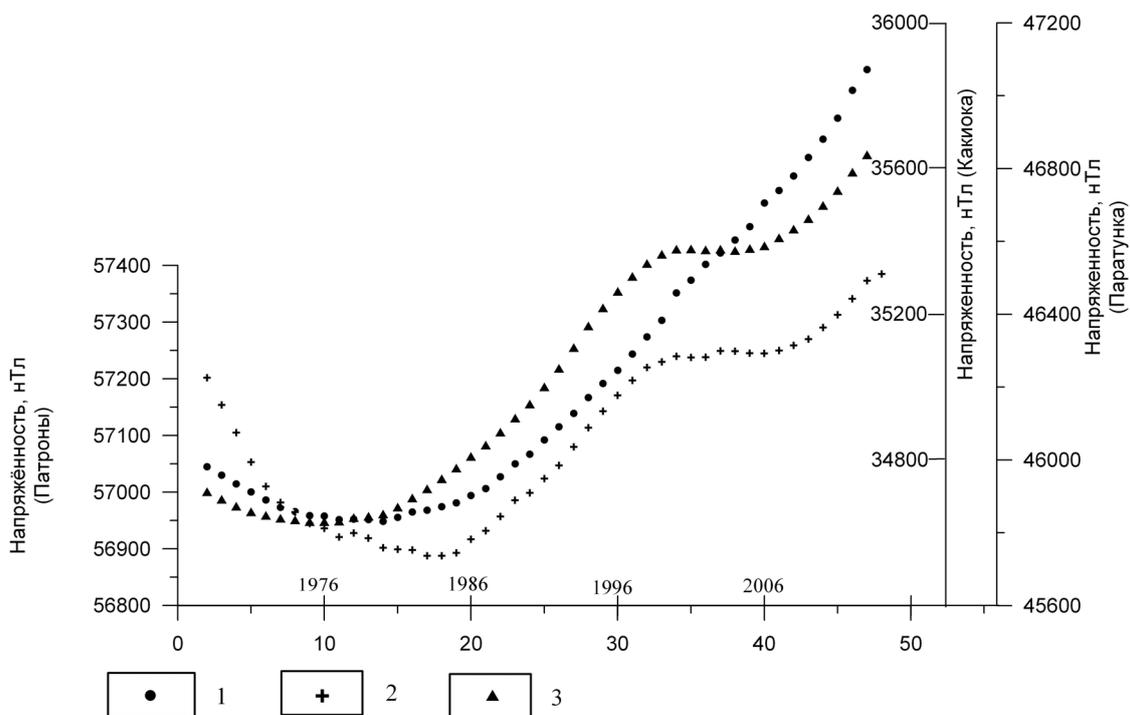


Рис. 2. Вековой ход геомагнитного поля в обсерваториях Камчатка (1), Иркутск (2) и Какиоки (3)

В этих обсерваториях имеются непрерывные наблюдения геомагнитного поля в последние десятилетия. По временным рядам выделены синхронные интервалы наблюдений с 1968 по 2014 г. Анализ выполнен по трём составляющим геомагнитного поля H , D , Z . При этом основное внимание уделено компоненте Z , которая более чувствительна к геоэлектрическим неоднородностям среды. Сравнительный анализ вековых ходов вертикальной составляющей в обс. Паратунка, Какиоки и Иркутск свидетельствует о следующем. В поведении вековых ходов в период с 1968 по 2008 г. на всех трёх обсерваториях выражены подобные вариации. Интенсивность вариаций составля-

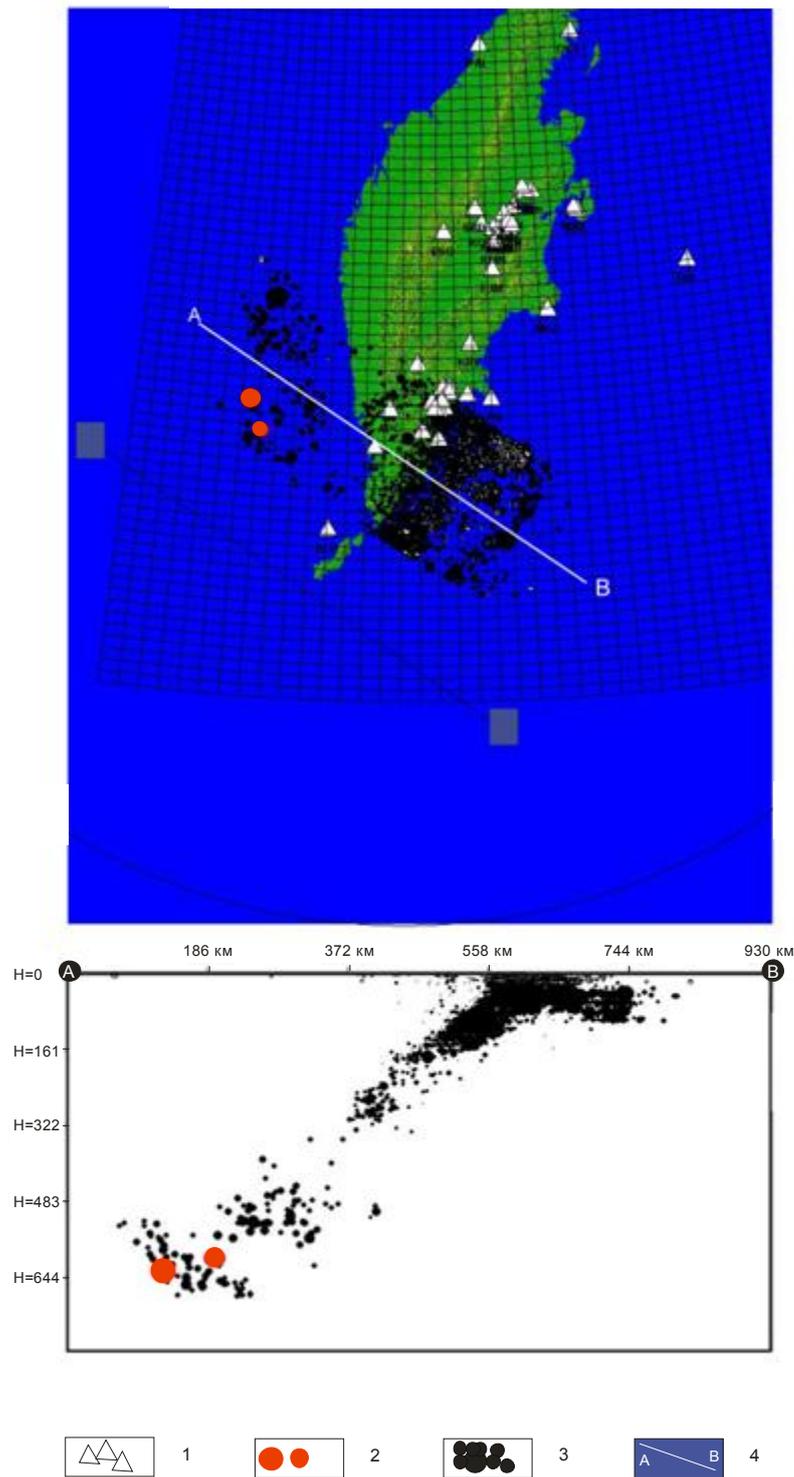


Рис. 3. Схема расположения эпицентров и гипоцентров землетрясений в районе Южной Камчатки:
 1 – сейсмологические станции; 2 – сильнейшие землетрясения в последние годы с $M \geq 7,3$;
 3 – землетрясения с меньшей магнитудой; 4 – профиль, по которому представлен сейсмологический разрез

ет первые сотни нТл. Важно отметить, что с 1998 по 2014 г. в поведении годовых ходов только в обс. Иркутск и Какиоки проявились вариации с периодом примерно 15 лет.

Интенсивность вариаций составляет около 100 нТл. Однако в обс. Паратунка данная вариация практически не проявилась. Возникает вопрос, почему вековой ход в обс. Паратунка отличается в последние 15 лет от вековых ходов Иркутска и Какиоки. В этой связи целесообразно обратиться к данным работы [2]. В ней изучена глубинная электропроводность Земли по данным геомагнитных обсерваторий. В результате этих исследований установлено, что на глубине примерно 700 км существует проводящий слой в верхней мантии. Природа слоя не ясна, но его глубины приблизительно совпадают с наиболее глубокими очагами землетрясений [1]. В работе [2] отмечается аномальное поведение фаз импеданса и более высокие значения сопротивлений в зоне субдукции. Автор приходит к выводу, что аномальные значения параметров электропроводности связаны с геоэлектрическими неоднородностями в верхней мантии. Обратимся к данным векового хода в обсерваториях Паратунка, Иркутск и Какиоки. Предполагается, что вариации с периодом 15 и более лет генерируются на границе нижней мантии и ядра. Эти вариации достигают поверхности Земли и регистрируются в обсерваториях. В случае возникновения геоэлектрических неоднородностей в верхней мантии ситуация может измениться и вариации указанного периода не проявятся в вековом ходе. Следует отметить, что в районе Камчатки в 2008, 2009, 2013 гг произошли сильнейшие землетрясения с $M = 7,3-7,4$ (рис. 3).

Гипоцентры расположены на глубинах около 600 км. Процессы, связанные с такими землетрясениями протекают десятки лет. Поэтому можно предположить, что в связи с такими землетрясениями возникли крупные геоэлектрические неоднородности в верхней мантии, которые отразились в вековом ходе вертикального магнитного поля в обсерватории Паратунка.

Библиографический список

1. Жарков В. И. Внутреннее строение Земли и планет. – М. : Наука, 1983. – 415 с.
2. Семёнов В. Ю. Оценка электропроводности мантии под континентами северного полушария // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 3. – С. 60–67.
3. Янковский Б. М. Земной магнетизм. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1978. – 591 с.



УДК 550.837.211

**В. М. Никифоров¹, Г. Н. Шкабарня², Н. А. Пальшин³, И. М. Варенцов⁴,
Д. В. Епишкин⁵, В. Б. Каплун⁶**

НОВЫЕ ГЛУБИННЫЕ МТ-ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРИМОРЬЕ И ПРИАМУРЬЕ

Аннотация. Понимание происходящих в зоне перехода от Тихого океана к Евразии процессов является ключевым при построении тектонических моделей оболочек Земли, а также моделей конвекции верхней мантии. Магнитотеллурический метод позволяет получать независимые от других геофизических методов оценки распределения температуры и флюидов в недрах Земли. Особенностью изучаемого региона является сложное неоднородное строение, которое характеризуется влиянием трёхмерного берегового эффекта и разломной тектоники. Несмотря на ограниченное финансирование проекта (особенно в 2015 году), удалось организовать и провести в 2014–2015 гг. полевые работы в Приморском крае и получить новые экспериментальные данные.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, электропроводность, переходные функции, мантия, зона субдукции, береговой эффект, глубинные разломы, комплексная интерпретация.

Об авторах:

^{^1} К. г.-м. н., зав. лаб., Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, e-mail: nikiforovv@mail.ru.

^{^2} К. г.-м. н., ст. н. сотр., Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, e-mail: shkabarnya@mail.ru.

^{^3} К. г.-м. н., зав. лаб., Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: palshin@ocean.ru.

^{^4} К. ф.-м. н., директор ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Троицк, e-mail: ivan_varentsov@mail.ru.

^{^5} Аспирант, Московский государственный университет им. М. И. Ломоносова, Москва, e-mail: dmitri_epishkin@mail.ru.

^{^6} К. г.-м. н., зав. лаб., Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, e-mail: kaplun@itig.as.khb.ru.

*V. M. Nikiforov, G. N. Shkabarnya, N. A. Palshin, I. M. Varentsov,
D. V. Epishkin V. B. Kaplun*

NEW DEEP MT SOUNDINGS IN PRIMORYE

Abstract. *Understanding of processes in the transition zone from the Pacific Ocean to Eurasia is important for construction of tectonic models of the Earth's shells, as well as models of the upper mantle convection. Magnetotelluric method allows to obtain independent from other geophysical methods estimates of temperature and fluid distribution in the upper mantle. The peculiarity of the studied region is a complicated and heterogeneous structure characterized by the influence of the three-dimensional coast effect and deep faulting. Despite limited funding for the Project (especially in 2015) MT survey in the Primorsky Krai was arranged and new experimental data were collected.*

Keywords: *magnetotelluric soundings, electrical conductivity, transfer functions, mantle, subduction zone, coastal effect, deep faults, joint interpretation.*

Измерения были выполнены в четырёх полевых пунктах (рис. 1) и геомагнитной обсерватории «Горнотаежное». На полевых пунктах регистрировались пять компонент электромагнитного поля (E_x , E_y , H_x , H_y и H_z), тогда как на обсерватории «Горнотаежное» – только три магнитных компоненты (H_x , H_y и H_z). Для измерений применялись две магнитотеллурические станции LEMI-417 с феррозондовым трёхкомпонентным магнитометром и трёхкомпонентная феррозондовая магнитовариационная станция LEMI-425. Длительность измерений составила от одной до двух недель, что позволило получить оценки переходных функций в диапазоне периодов от 10–20 до 10000 секунд.

На пунктах, расположенных в Приморском крае, были дополнительно выполнены кратковременные измерения с помощью МТ-станции «Метроникс». На пункте В1D и вокруг него были выполнены односуточные измерения с помощью МТ станции «Феникс» с целью оценки влияния приповерхностных неоднородностей на глубинное МТЗ. В состав станций «Метроникс» и «Феникс» входят индукционные магнитные датчики MFS-06, АМТС-30, МТС-50, что позволило получить оценки переходных функций в короткопериодном диапазоне.

Для обработки полученных данных использовались современные методы оценивания переходных функций, что позволило получить достоверные несмещённые оценки полного набора магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) параметров [1, 2].

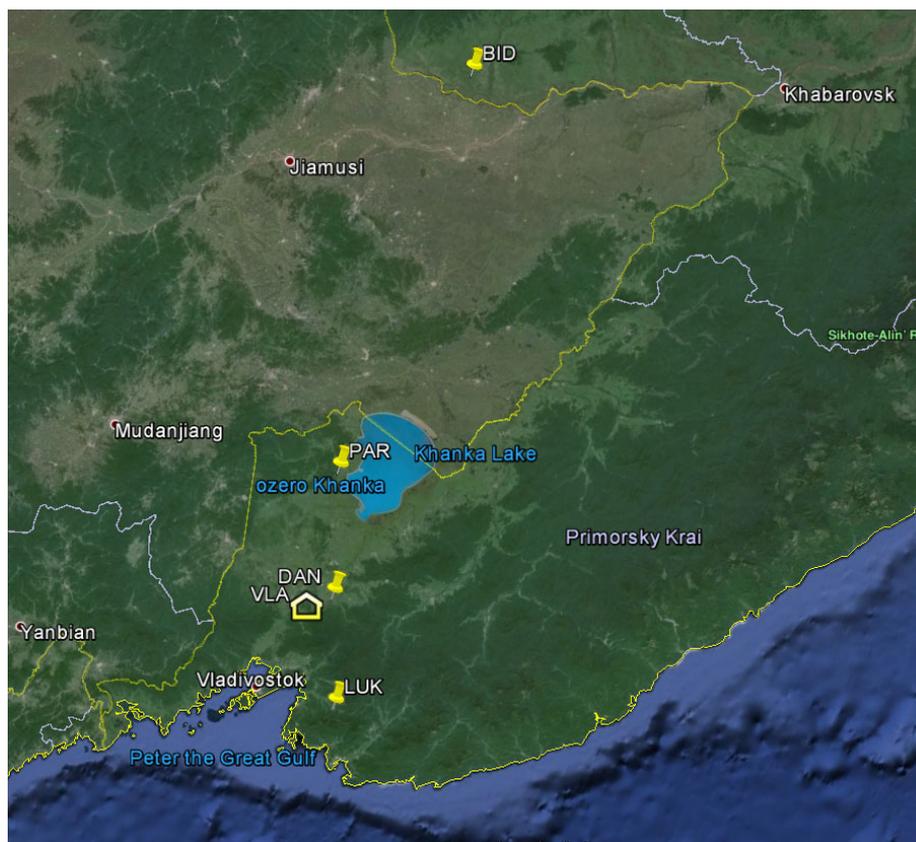


Рис. 1. Схема расположения пунктов долговременной регистрации МТ-поля в Приморье в 2014–2015 гг.: VLA – обсерватория «Vladivostok» в посёлке Горнотаежное, полевые пункты: PAR (Пархоменко), LUK (Лукьяновка), DAN (Даниловка) и BID (Биджан)

На рис. 2 приведены значения компонент кажущегося сопротивления и фазы импеданса для двух пунктов LUK и PAR, в которых измерения проводились в 2014 году, а также для пункта BID, где измерения выполнялись в 2015 г. Анализ и обработка данных, полученных в 2015 году, продолжается. Для пунктов Лукьяновка LUK и Пархоменко PAR приведены кривые кажущегося сопротивления, полученные с помощью станции LEMI-417, а для пункта Биджан BID показана кривая кажущегося сопротивления, полученная с помощью станции MTU-5 Phoenix Geophysics.

Поведение тензора импеданса в Лукьяновке и Пархоменко типично для прибрежных районов, подверженных береговому эффекту. В Лукьяновке также наблюдается выход фазы из квадранта на длинных периодах, что свидетельствует о существовании трёхмерного индукционного эффекта, по всей видимости это совместное влияние проводящего разлома и берегового эффекта. Поведение тензора импеданса и кривых кажущегося сопротивления в пункте Биджан существенно отличается от первых двух и за исключением самых длинных периодов характеризуется выраженным двумерным характером (главные компоненты импеданса на полтора порядка больше дополнительных).

На рис. 3 приведены индукционные векторы магнитного поля для всех четырёх пунктов, обсерватории и одного пункта, расположенного в Манчжурии (099). Анализ поведения индукционных векторов в целом подтверждает выводы, сделанные по анализу импедансов. Так, в пункте Лукьяновка LUK, расположенном вблизи побережья, наблюдается хорошо выраженный береговой эффект: значения реального индукционного вектора на периоде 1024 и 2048 секунд составляют более 0,3, а направление век-

тора соответствует береговому эффекту. Похожее поведение индукционных векторов на длинных периодах на пунктах Горнотаежное VLA и Даниловка DAN также свидетельствует о существовании здесь берегового эффекта. В то же время, на расположенных дальше от береговой линии пунктах 099 и Биджан BID выраженного берегового эффекта нет.

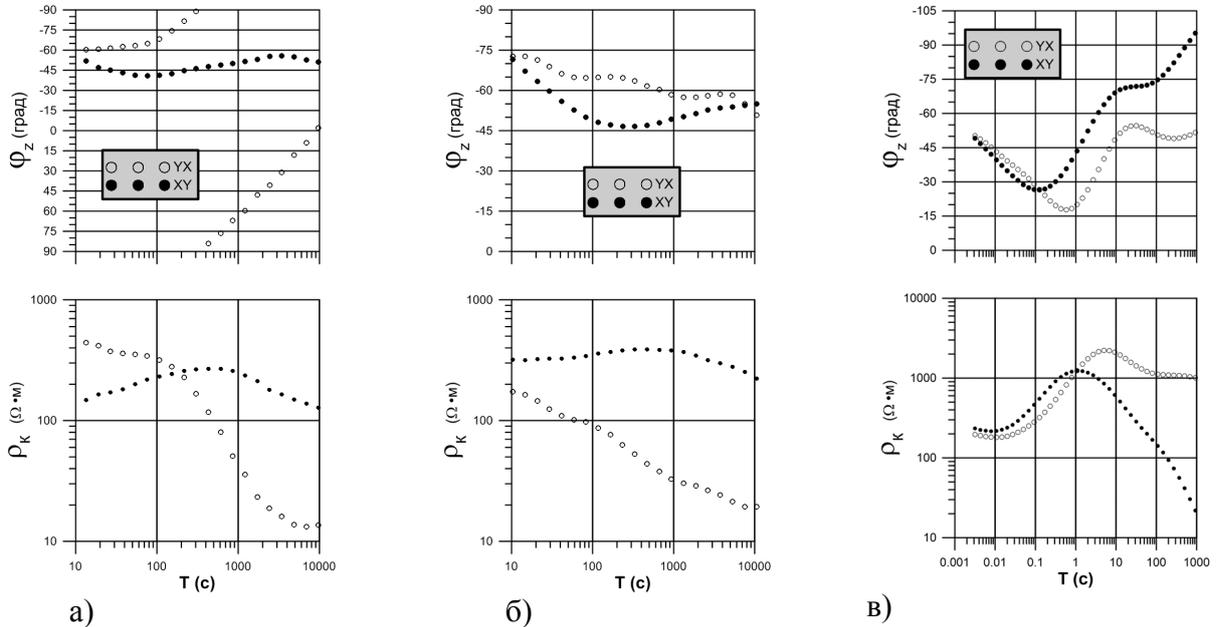


Рис. 2. Значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса в географических координатах для пункта Лукьяновка LUK (а), Пархоменко PAR (б) и Биджан BID (в)

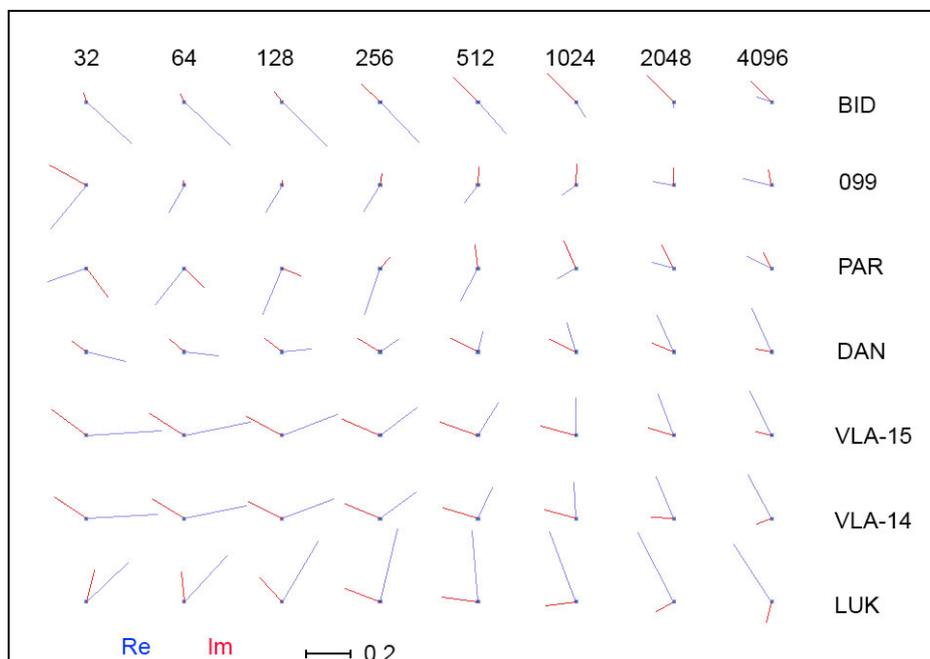


Рис. 3. Индукционные векторы для 6 пунктов в Приморском крае, Манчжурии и Еврейской АО. Столбцам соответствуют периоды (периоды в секундах показаны сверху), а строкам – пункты наблюдения (обозначения пунктов приведены справа). Направление индукционных векторов – от проводника. Цифры у пункта VLA соответствуют годам измерения. Пункт 099 расположен в Манчжурии на территории Китая

В поведении индукционных векторов в диапазоне периодов от 32 до 256 секунд региональных закономерностей не наблюдается, что можно объяснить преобладающим действием локальных неоднородностей электропроводности, связанных с наличием проводящих разломов. Существование аномального поведения индукционных векторов в диапазоне периодов 32–256 секунд в пунктах Лукьяновка, Горнотаежное, Пархоменко и Биджан может свидетельствовать о существовании локальных проводников в окрестностях этих пунктов.

Отсутствие коллинеарности реальных и мнимых индукционных векторов во всех пунктах, кроме ВІD, свидетельствует о существовании трёхмерных неоднородностей. В то же время коллинеарность реальных и мнимых векторов и их большая длина (около 0,3 на периоде 256 секунд) говорят о наличии вытянутой аномалии электропроводности.

Проявление берегового эффекта в полученных данных оказалось несколько слабее, чем ранее полученные теоретические оценки [3], что свидетельствует о нормализующем влиянии разломной тектоники. Для понимания влияния разломов на поведение магнитотеллурических переходных функций планируется проведение дополнительных измерений между пунктами глубинных МТЗ с использованием методики АМТЗ. В дальнейшем также будет выполнено трёхмерное численное моделирование с целью объяснения наблюдаемых аномалий.

В целом, все полученные данные и результаты их предварительного анализа уверенно свидетельствуют, что характерной чертой геоэлектрического строения Приморья является проявление трёхмерного берегового эффекта, осложнённого разломной тектоникой.

Полученные новые данные, их детальный анализ и обработка, а также комплексная интерпретация с учётом имеющихся геолого-геофизических данных по дальневосточному региону позволит уточнить имеющиеся геоэлектрические модели и их тектоническое истолкование.

Библиографический список

1. *Varentsov I. M.* Joint robust inversion of MT and MV data / EM sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40). – Elsevier, 2007. – P. 189–222.
2. *Epishkin D.* Advances in remote references data processing: using remote electric channels // Proceedings of 22nd EM Induction Workshop, Weimar, Germany, 24–30.08.2014.
3. *Никифоров В. М., Пальшин Н. А., Старжинский С. С., Кузнецов В. А.* Численное моделирование трёхмерного берегового эффекта в Приморье // Физика Земли. – 2004. – № 8. – С. 56–69.



УДК 517.958:550.3 517.958:550.8

*М. Г. Персова^{^1}, Ю. Г. Соловейчик^{^1}, Д. В. Вагин^{^1}, Ю. И. Кошкина^{^1},
О. С. Трубачева^{^1}*

О НОВОМ ПОДХОДЕ К ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ 3D-ИНВЕРСИИ ДАНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ*

Аннотация. В работе рассматривается подход к геометрической 3D-инверсии с одновременным разделением сигналов становления поля и вызванной поляризации в проводящих средах и восстановлением координат границ трехмерных неоднородностей, их удельного сопротивления и поляризуемости. Демонстрируется работоспособность предлагаемого подхода на синтетических данных.

Ключевые слова: нелинейная 3D-инверсия, электроразведка становлением поля, вызванная поляризация.

Об авторах:

^{^1} Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск.

M. G. Persova, Yu. G. Soloveichik, D. V. Vagin, Yu. I. Koshkina, O. S. Trubacheva

A NEW APPROACH TO GEOMETRICAL 3D-INVERSION OF GEOELECTRIC PROSPECTING DATA WITH RECOVERING PARAMETERS OF RESISTANCE AND POLARIZABILITY OF A CONDUCTING MEDIUM IN TIME DOMAIN

Abstract. The article considers an approach to the geometrical 3D-inversion with the simultaneous division of field formation and induced polarization in conducting media and the recovery of boundary coordinates of three-dimensional inhomogeneities, their resistivity and polarizability. The performance of the proposed approach is demonstrated on synthetic data.

Keywords: nonlinear 3D-inversion, geoelectric prospecting with field formation, induced polarization.

Известно, что важным поисковым признаком некоторых месторождений полезных ископаемых является наличие зон повышенной поляризации (ВП). При этом одновременный подбор параметров сопротивления и поляризуемости при работе в проводящих средах зачастую приводит к сильной неоднозначности решения соответствующих обратных задач.

В данной работе предлагается подход к геометрической 3D-инверсии с восстановлением координат границ трехмерных неоднородностей, их удельного сопротивления и поляризуемости, позволяющий за счет разделения сигналов становления поля и вызванной поляризации снизить области эквивалентности. При этом 3D-инверсию

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации.

предлагается выполнять в два этапа. На первом этапе осуществляется восстановление трехмерной структуры проводимости среды с одновременным разделением сигналов становления поля и вызванной поляризации. Эта задача решается путем минимизации функционала вида

$$\Phi^\alpha(\mathbf{b}) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \left(v_{lk} \left(\delta \mathcal{E}_{lk}(\mathbf{b}) - \sum_{p=1}^P \theta_l^p \beta_{lk}^p \right) \right)^2 + \sum_{m=1}^M \alpha_m (\Delta b_m)^2 + \sum_{n=1}^N \tilde{\alpha}_n (\theta_n)^2, \quad (1)$$

где $\delta \mathcal{E}_{lk} = \tilde{\mathcal{E}}_{lk} - \mathcal{E}_{lk}$ – ошибки (невязки) в сигналах, \mathcal{E}_{lk} – сигналы, зарегистрированные в l -м приемнике в моменты времени t_k , $\tilde{\mathcal{E}}_{lk}$ – соответствующие теоретические сигналы, полученные в результате конечноэлементного решения прямой трехмерной задачи [1]; \mathbf{b} – включающий в себя координаты границ трехмерных объектов и их удельные сопротивления вектор искомым параметров b_m , описывающих трехмерную геоэлектрическую модель; \mathbf{b}^0 – вектор параметров b_m^0 , полученных на предыдущей итерации процедуры нелинейной 3D-инверсии; $\Delta b_m = b_m - b_m^0$; α_m и $\tilde{\alpha}_n$ – параметры регуляризации; v_{lk} – некоторые веса, отражающие уровень погрешности при приеме сигнала в l -м приемнике и масштаб изменения принимаемого сигнала по времени; θ_l^p – дополнительные параметры, позволяющие выделить из измеренных сигналов их составляющие, соответствующие процессам ВП; $\beta_{lk}^p = \beta_l^p(t_k)$, $\beta_l^p(t_k)$ – функции спада, P – количество слоев (зон) в геоэлектрической модели с различными функциями спада.

При выполнении 3D-инверсии не только теоретические сигналы $\tilde{\mathcal{E}}_{lk}$, но и производные по параметрам трехмерной модели рассчитываются путем конечноэлементного решения соответствующих трехмерных задач в специальной постановке [2].

На втором этапе осуществляется подбор параметров поляризуемости по остаточным сигналам, получившимся после вычитания из практических данных сигналов становления поля, рассчитанных для полученной на первом этапе трехмерной модели проводимости. Соответствующий математический аппарат представлен в работе [1]. Заметим, что поскольку ВП имеет более локальное влияние (при латеральном удалении приемников от зон поляризации сигналы от них очень быстро затухают), а также, как правило, поляризующиеся объекты ищутся на определенной глубине, на которую сфокусирована установка, то поиск параметров ВП может быть достаточно успешно осуществлен с использованием ячеистых структур.

Продемонстрируем работоспособность предлагаемых методов на синтетических данных морского варианта электроразведки ДНМЭ [3, 4]. Геоэлектрическая модель, для которой посредством 3D-моделирования синтезировались данные, представлена на рис. 1. Электромагнитное поле возбуждалось погруженной на 20 м горизонтальной электрической линией длиной 700 м, перемещаемой по профилю (43 положения), показанному на рис. 1. Измерения выполнялись семиэлектродной установкой (в диапазоне времен от 0,1 мс до 4 с), с помощью которой измеряются как первая, так и вторая разности потенциалов на трех электрических линиях.

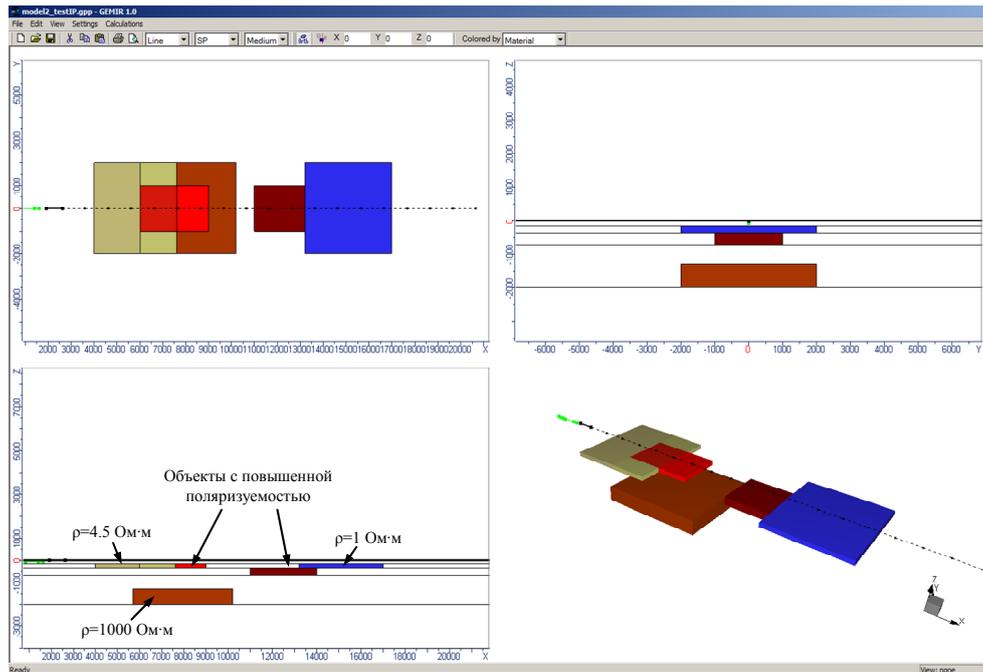


Рис. 7. «Истинная» геоэлектрическая модель

На рис. 2 представлен разрез удельного сопротивления «истинной» геоэлектрической модели, а на рис. 3 – стартовая модель для первого этапа 3D-инверсии, которая представляет собой «слои» пробных объектов (объектов-«зародышей»), удельное сопротивление которых совпадает с удельным сопротивлением выбранной тем или иным способом (например, подобранной с помощью 1D-инверсии по совокупности всех данных) вмещающей среды (в том месте, где расположен пробный объект). Искомыми параметрами в нелинейной 3D-инверсии (выполняемой на первом этапе) были взяты удельные сопротивления объектов-«зародышей» верхних трех слоев (расположенных до слабопроводящего фундамента) и X-координаты латеральных границ между объектами (поскольку в рассматриваемом примере измерения выполнялись вдоль одного профиля, границы по Y для объектов-«зародышей» фиксировались). Четвертый слой объектов-«зародышей» был задан на границе с фундаментом, при этом сопротивление этих объектов было зафиксировано равным сопротивлению фундамента, а в качестве поисковых параметров для этих объектов-«зародышей» были взяты координаты двух границ по X и верхняя граница по Z. Разрезы удельного электрического сопротивления для геоэлектрических моделей, полученных после 2-й, 4-й и 11-й итераций, представлены на рис. 4–6. Из сравнения рис. 2 и рис. 6 видно, что полученная в результате 3D-инверсии геоэлектрическая модель достаточно хорошо соответствует истинной. Изменение функционала невязки по итерациям представлено в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость значения функционала невязки от номера итерации 3D-инверсии

№ ит.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ф	0,08	0,04	0,021	0,012	0,0086	0,0057	0,0049	0,0035	0,0033
№ ит.	9	10	11						
Ф	0,0028	0,00276	0,00274						

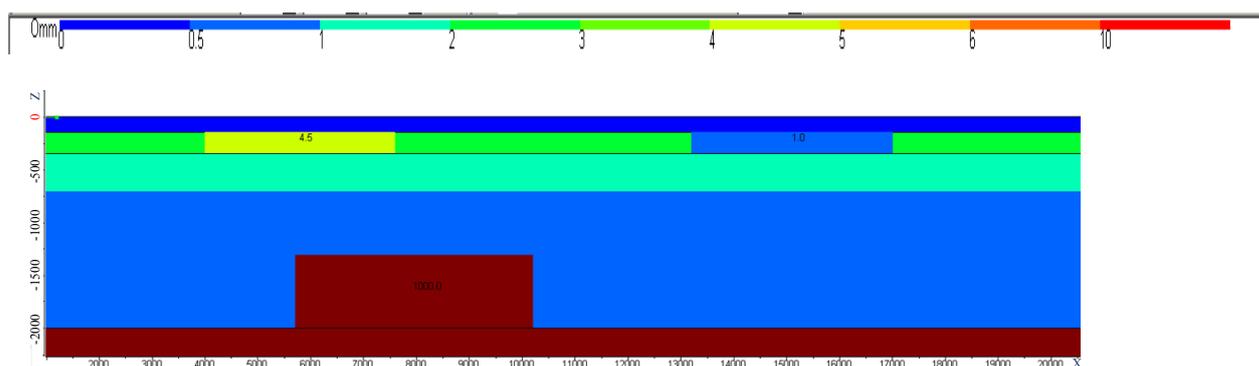


Рис. 8. Разрез удельного сопротивления «истинной» геоэлектрической модели

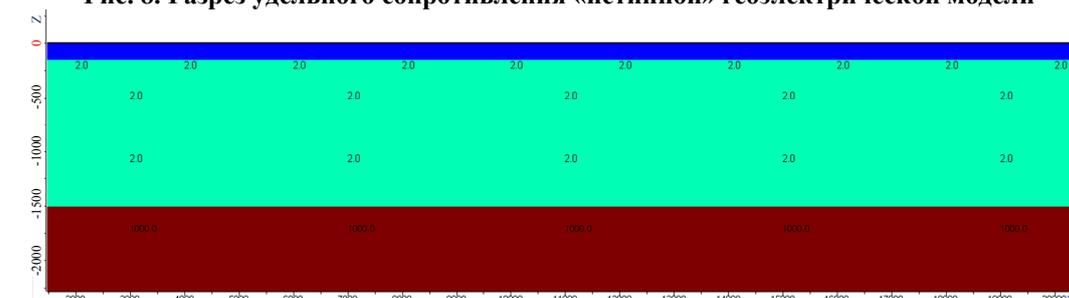


Рис. 9. Разрез удельного сопротивления стартовой геоэлектрической модели

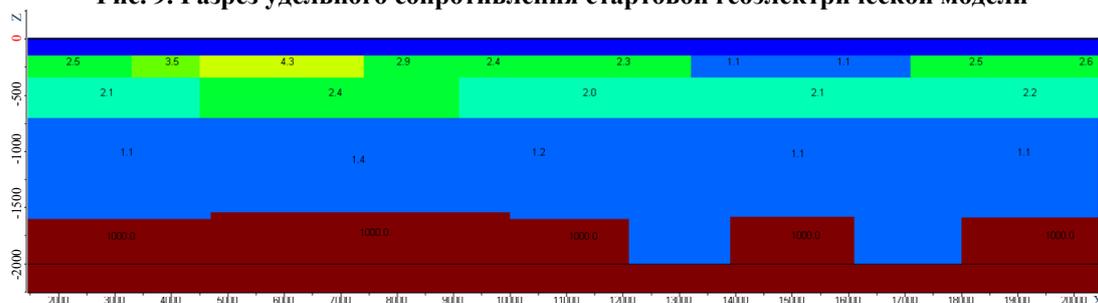


Рис. 10. Разрез удельного сопротивления геоэлектрической модели, полученной на 2-й итерации 3D-инверсии

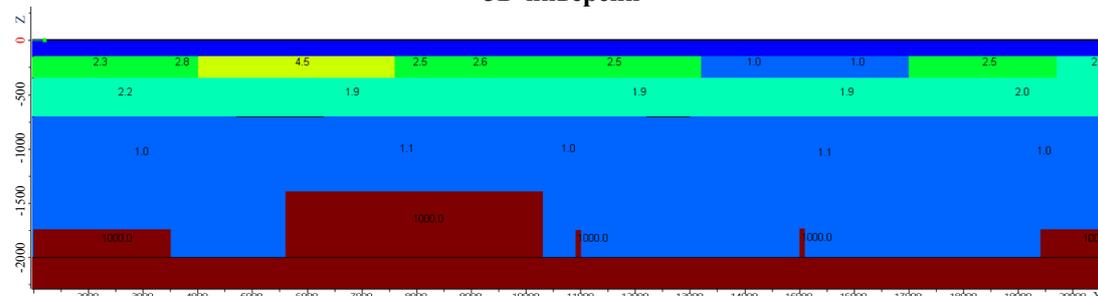


Рис. 11. Разрез удельного электрического сопротивления геоэлектрической модели, полученной на 4-й итерации 3D-инверсии

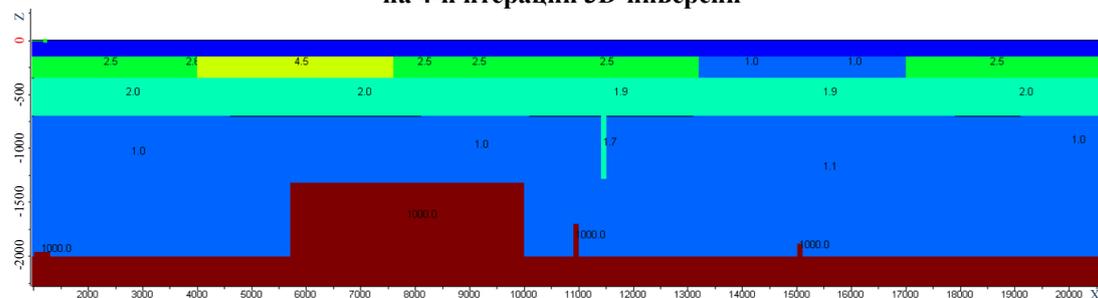


Рис. 12. Разрез удельного электрического сопротивления геоэлектрической модели, полученной на 11-й итерации 3D-инверсии

Для полученной на этом этапе геоэлектрической модели были рассчитаны сигналы становления поля и затем вычтены из «практических» (рассчитанных с учетом ВП для истинной модели) данных. Остаточные сигналы и полученная в результате первого этапа 3D-инверсии модель сопротивления были поданы на вход процедуры, реализующей 3D-инверсию данных ВП [2]. 3D-инверсия данных ВП выполнялась в ячеистой структуре (с поиском значений поляризуемости в каждой ячейке) с учетом полученной в результате первого этапа инверсии модели сопротивления. Разрезы истинного и полученного в результате второго этапа 3D-инверсии распределения поляризуемости приведены на рис. 7. Представленные результаты свидетельствуют о том, что полученная модель поляризуемости также достаточно хорошо соответствует истинной модели.

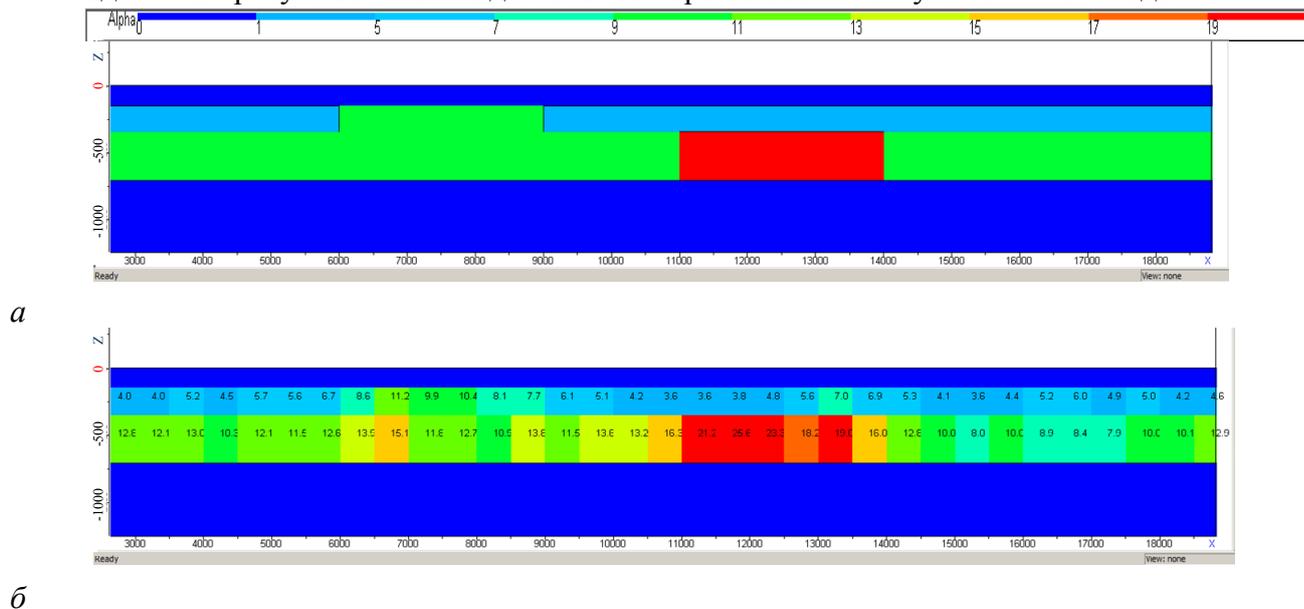


Рис. 13. Разрез «истинного» (а) и полученного (б) в результате второго этапа 3D-инверсии распределения поляризуемости

Следует отметить, что использованная для создания синтетических данных геоэлектрическая модель была построена на основе результатов обработки практических данных, поэтому процентное соотношение влияния процессов ВП и становления поля в синтезированных кривых, которые подавались на вход разработанной процедуры 3D-инверсии, соответствовало реальным условиям морской электроразведки (в первой разности потенциалов не превышало 20–30 % в области поздних времен, что было сопоставимо с влиянием в сигнале трехмерных неоднородностей сопротивления). Этот факт подтверждает корректность представленной верификации разработанной процедуры 3D-инверсии, а также работоспособность этой процедуры при ее использовании в практических работах.

Заметим также, что на практике трехмерные неоднородности сопротивления (особенно соляные купола и изменение рельефа дна) будут оказывать влияние и по третьей координате, поэтому необходимо использование площадных систем наблюдения. При этом разработанное программное обеспечение может быть использовано без изменений (естественно, с добавлением объектов-«зародышей» в стартовую модель).

Библиографический список

1. Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г. М. Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов. // Физика Земли. – 2011. – Т. 47. – № 2. – С. 3–14.

2. Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Тризубович Г. М., Токарева М. Г. Методы и алгоритмы восстановления трехмерной структуры проводимости и поляризуемости среды по данным электромагнитных зондирований на основе конечноэлементного 3D-моделирования // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 30–45.

3. Veeken P. C. H., Legeydo P., Davidenko Yu., Kudryavceva E., Ivanov S, Chuvayev A. Benefits of the induced polarization geoelectrical method to hydrocarbon exploration // Geophysics. – 2009. – Vol. 74. – No. 2. – Pp. B47–B59.

4. Flekkoy E., Legeydo P. Using DNME technology in Nord Sea: case history // The 2nd International CSEM Conference. CSEM in hydrocarbon exploration and exploitation, Oslo, May 14–15, 2013.



УДК 550.837.211

Н. С. Голубцова^{^1}, *М. Израиль*^{^2}, *П. Ю. Пушкарев*^{^1}, *М. Ю. Смирнов*^{^3},
Е. Ю. Соколова^{^4}

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ТРЁХМЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ГАРВАЛЬСКИХ ГИМАЛАЯХ*

Аннотация. Крупнейшая горная система Гималаев сформировалась при поддвиге Индостанской тектонической плиты под Евразийскую и характеризуется повышенной сейсмической активностью. Изучение модели сейсмогенерации требует проведения комплекса глубинных геофизических исследований. МТ/МВ-зондирования выполнены в Гарвальских Гималаях (северная Индия). 2D-инверсия МТ-данных показала их высокую информативность по отношению к региональным коровым структурам. Однако анализ МВ-откликов выявил 3D-эффекты, по-видимому, обусловившие некоторые артефакты профильной инверсии МТ-данных. Результаты 2D-инверсии по профилю Рурки – Ганготри по программе И. М. Варенцова верифицированы региональными сейсмологическими данными. Представлена прогнозная 3D-геоэлектрическая модель региона, составленная с помощью программы R. Maskie, а также предварительные результаты 3D-инверсии данных зондирований с использованием кодов W. Siripunvaraporn и G. Egbert, A. Kelbert.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, трёхмерная инверсия, Гималаи.

Об авторах:

^{^1} Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва.

^{^2} Индийский институт технологий Рурки, Индия.

^{^3} Университет Оулу, Финляндия.

^{^4} Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, Москва.

N. S. Golubtsova, M. Israel, P. Yu. Pushkarev, M. Yu. Smirnov, E. Yu. Sokolova

FIRST EXPERIENCE OF THREE-DIMENSIONAL INTERPRETATION OF MAGNETOTELLURIC DATA OBTAINED IN GARHWAL HIMALAYA

Abstract. The largest mountain system of Himalaya created by the subduction of Indian tectonic plate beneath Eurasian is characterized by high seismic activity. MT/MV soundings were performed in Garhwal

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 10-05-92661_Инд и 13-05-9269_Инд, а также DST (Индия).

Himalaya (Northern India). 2D MT data inversion results demonstrated good resolution of the regional crustal structures. However, MV responses analysis revealed 3D effects, probably causing some artifacts of profile MT data inversion. We present the results of 2D inversion using I. M. Varentsov's program along Roorkee – Gangotri profile in comparison with seismologic data, as well as 3D resistivity forecast model of the region, obtained using R. Mackie's program, and preliminary results of 3D inversion obtained using codes of W. Siripunvaraporn program and program by G. Egbert and A. Kelbert.

Keywords: magnetotelluric sounding, 3D inversion, Himalaya.

Гималаи представляют собой крупнейшую горную систему, формирующуюся в ходе коллизии тектонических плит с погружением Индостанской плиты под Евразийскую и образованием гигантских надвигов. Гарвальские Гималаи расположены на севере Индии, в штате Уттаракханд. С целью изучения их глубинного строения и сейсмологического прогноза применяется комплекс геофизических исследований, включающий магнитотеллурические и магнитовариационные (МТ/МВ) зондирования. Большая их часть выполнена Индийским институтом технологий Рурки. Основу сети наблюдений составляет профиль от города Рурки до ледника Ганготри (рис. 1). Ежегодно выполняется несколько новых зондирований, постепенно создаётся площадная сеть наблюдений.

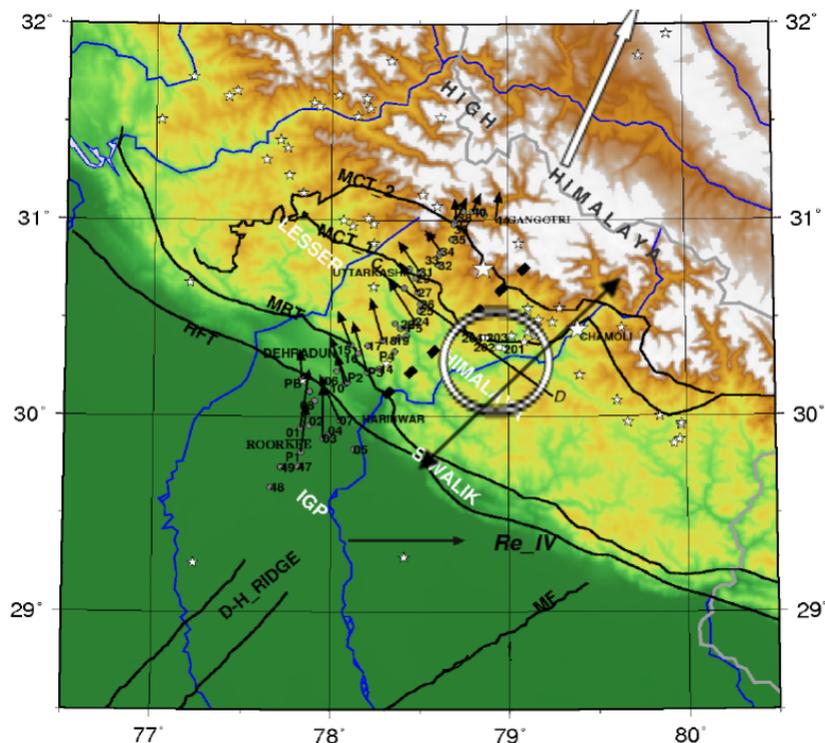


Рис. 14. Точки МТЗ на физической карте изучаемого района. Обозначения рассмотрены в тексте

Точки МТ/МВ-зондирований показаны на рис. 1 серыми кружками с номерами. Профиль Рурки – Ганготри начинается в Индо-Гангской равнине (Indo-Gangetic Plain, IGP) и на своём пути пересекает несколько геологических структур, надвинутых друг на друга с северо-востока. Первая, Сивалик (Siwalik), представляет собой предгорье Гималаев и ограничена с юга Гималайским фронтальным надвигом (Himalayan Frontal Thrust, HFT), а с севера – Главным граничным надвигом (Main Boundary Thrust, MBT). И в предгорном прогибе Индо-Гангской равнины, и в Сивалике верхние несколько километров сложены неогеновой молассой. Далее на северо-восток, вплоть до зоны Глав-

ного центрального надвига (Main Central Thrust, МСТ), которая в районе профиля ограничена двумя взбросами МСТ_1 и МСТ_2, расположены Низкие Гималаи (Lesser Himalaya), в основном сложенные эпизонально-метаморфизованным верхним докембрием. Заканчивается профиль в Высоких Гималаях (High Himalaya), образованных главным образом докембрийскими кристаллическими сланцами и гнейсами, а также неогеновыми гранитоидами.

Малыми звёздами на рис. 1 показаны эпицентры землетрясений Гималайского сейсмического пояса (в данном регионе – Гарвальского сейсмического коридора) с магнитудами $M_b > 3$, а большими звёздами – эпицентры последних крупнейших землетрясений: Чамоли (Chamoli, $M_b = 6,3$, 1999 г.) и Уттаркаши ($M_b = 6,8$, 1991 г.). Чёрная линия со стрелками на концах отвечает профилю сейсмотомографии, результаты с которого использовались при комплексной интерпретации.

В результате 2D-инверсии МТ/МВ-данных по профилю Рурки – Ганготри с помощью программы И. М. Варенцова [1] был построен геоэлектрический разрез до глубины 50 км (рис. 2). На разрез из полосы 75 км вокруг профиля спроецированы гипоцентры землетрясений $M_b > 3$ (большие звёзды) и локальная сейсмичность (малые звёзды). Здесь же представлена геоэлектрическая интерпретация положения основных структурно-тектонических линий: пунктиром показаны предположительные поверхности надвигов НФТ, МВТ, МСТ1, МСТ2. Они выполаживаются с глубиной и смыкаются с обозначенным сплошной линией Главным гималайским надвигом (Main Himalayan Thrust, МНТ), который является кровлей погружающейся Индостанской плиты.

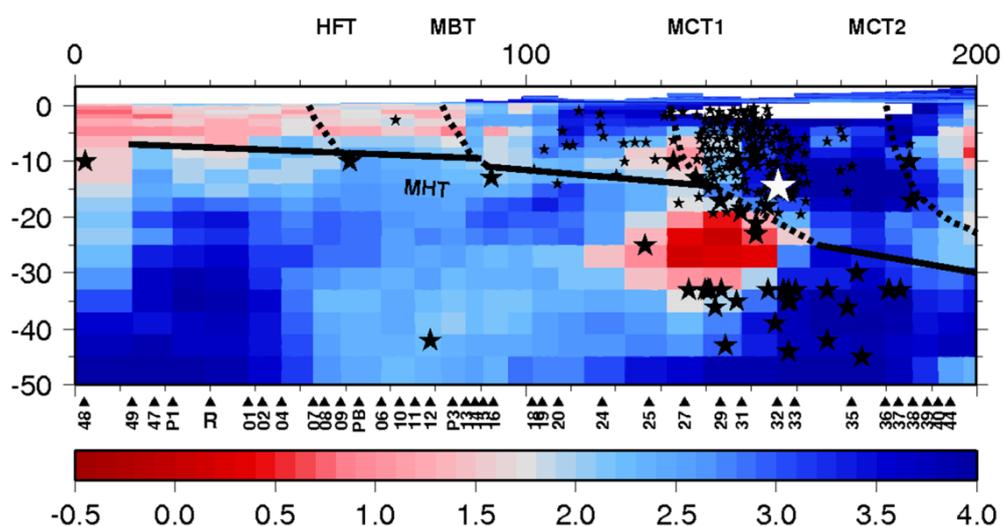


Рис. 15. Геоэлектрический разрез по профилю Рурки – Ганготри (с юго-запада на северо-восток). Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Обозначения рассмотрены в тексте

Наиболее яркие аномалии пониженного сопротивления и повышенной сейсмичности приурочены к области МСТ1, где предполагается увеличение угла погружения МНТ (т. н. рамповая структура). Зоны повышенной сейсмичности в теле надвига и в нижней коре разделены среднекоревым проводником. Его положение совпадает с зоной пониженных скоростей в образах сейсмотомографии [2, 3], что свидетельствует о единой флюидной природе этих аномалий и верифицирует профильные результаты обоих методов при изучении региональных глубинных структур Гималаев на материалах Гарвала.

Однако в геоэлектрическом образе зоны подвига Индийской плиты, полученном по результатам МТ-инверсии по линии Рурки – Ганготри, содержатся и артефакты, обусловленные влиянием проводящих структур вне профиля и требующие дополни-

тельного анализа. Вернёмся к рис. 1. На нём в пунктах МВ-наблюдений показаны индукционные стрелки (в конвенции Визе) на периоде 725 с в масштабе, заданном единичным вектором Re_{IV} . В центре профиля стрелки смотрят почти поперёк линии профиля, демонстрируя, что к юго-востоку от профиля располагается мощный проводник. Он проявляется понижением сопротивления на средне-нижнекоровых глубинах под Малыми Гималаями в 2D-модели (рис. 2). О существовании этой проводящей структуры – Транс-Гималайского проводника (Trans-Himalayan Conductor, THC), выделенного по результатам более ранних МТ/МВ-исследований, – было впервые сказано в [4]. На рис. 1 предположительное положение его оси показано пунктирной линией. Геологические структуры, перпендикулярные оси Гималаев, в регионе известны, к ним относятся показанные на рис. 1 хребет Дели-Харидвар (Dehli-Haridwar Ridge, D-H Ridge) и Морадабадский разлом (Moradabad Fault, MF).

Очевидно, что региональную геоэлектрическую модель Гарвала необходимо строить в трёхмерном варианте. Прежде всего, для этого требуется наращивать сеть наблюдений. Линии С-Д на рис. 1 отвечает запланированный новый профиль МТ-зондирования. В области, выделенной окружностью, белыми квадратами показаны первые 4 точки профиля, выполненные в 2014 году.

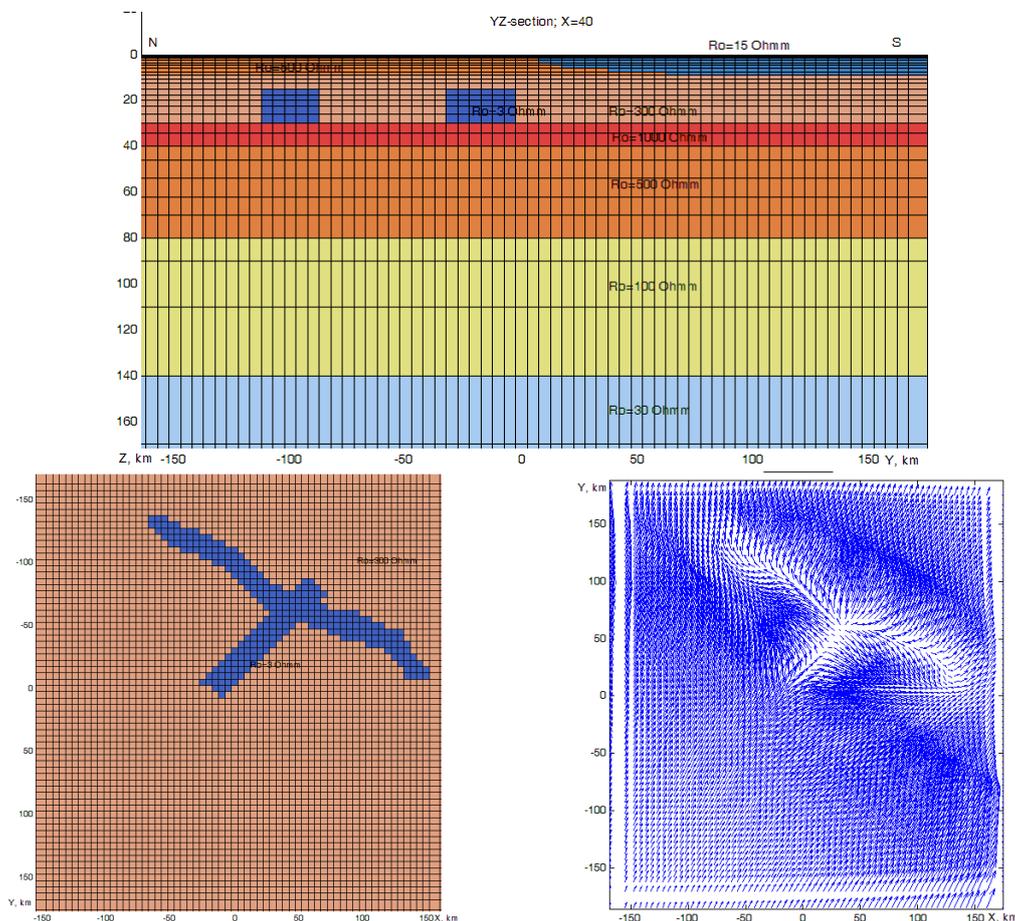


Рис. 16. Прогнозная геоэлектрическая модель Гарвальских Гималаев. Вверху – разрез модели в плоскости $x = 40$ км (с севера на юг), внизу слева – карта на глубине $z = 15$ км, справа – карта индукционных стрелок, рассчитанных на периоде 1000 секунд

Также начата работа по построению 3D-моделей с использованием программ решения прямых и обратных задач. С помощью программы R. Maskie [5] изучен ряд моделей разной сложности, последняя из которых представлена на рис. 3. Она включает в

себя слой осадков, мощность которого меняется по площади от 0 до 9 км, подстилаемый слоистым разрезом с характерными для Индийской плиты параметрами, а также два коровых проводника: МСТ1 и ТНС. Модельные МТ/МВ-данные отражают основные особенности наблюдаемых данных на профиле Рурки – Ганготри.

3D-инверсия выполнена с помощью двух программ, при этом использовались 4 компоненты тензора импеданса, стартовой моделью являлся слоистый разрез, тот же, что и в рассмотренной выше прогнозной модели. В качестве примера результатов, полученных по программе W. Siripunvaraporn [6], на рис. 4 показана карта сопротивления на глубине 22 км. Детальность модели невысока, однако достаточно отчетливо выделяются два квазилинейных проводящих объекта СЗ- и СВ-простирающихся (предполагаемые проводники МСТ1 и ТНС соответственно). По программе G. Egbert и A. Kelbert [7] первый результат получился ещё более сглаженным (рис. 5), но положение максимумов проводимости коррелирует с представленным на рис. 4. Первые результаты 3D-инверсии будут уточняться с использованием расширенных наборов данных и более оптимальных параметров программ инверсии.

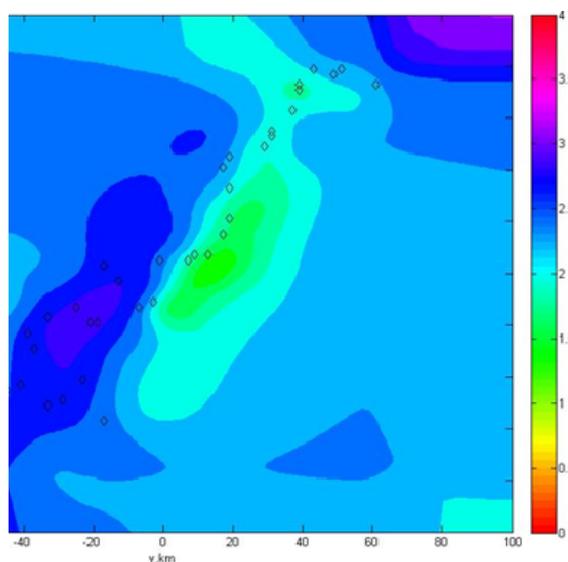


Рис. 17. Карта сопротивления на глубине 22 км, полученная при 3D-инверсии по программе [3]. Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Ромбами показаны точки наблюдения

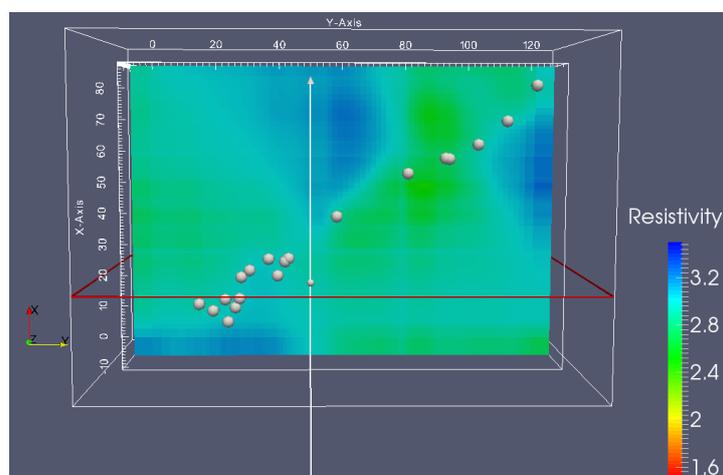


Рис. 18. Карта сопротивления на глубине 20 км, полученная при 3D-инверсии по программе [4]. Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Кружками показаны точки наблюдения

Авторы признательны П. Гупте, И. М. Варенцову, А. В. Кошурникову, М. В. Черватовой и Т. А. Егоровой за их вклад в МТ/МВ-исследования Гарвальских Гималаев.

Библиографический список

1. *Varentsov I. M.* Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data. *Electromagnetic sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40, ed. V. V. Spichak)*. – Elsevier, 2007. – P. 189–222.
2. *Caldwell W. B., Klemperer S. L., Rai S. S., Lawrence J. F., Ashish.* Characterizing the Main Himalaya Thrust in the Garhwal Himalaya, India with receiver function CCP stacking // *E.P.S. Lett.* – 2013. – № 367. – P. 15–27.
3. *Mukhopadhyay S., Sharma J.* Crustal scale detachment in the Himalayas: a reappraisal // *Geophys. J. Int.*, 2010. – № 183. – P. 850–860.
4. *Arora B. R., Mahashabde M. V.* A transverse conductive structure in the northwest Himalaya // *PEPI.* – 1987. – № 45. – P. 119–127.
5. *Mackie R. L., Smith J. T., Madden T. R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // *Radio Science.* – 1994. – № 29. – P. 923–935.
6. *Siripunvaraporn W., Egbert G., Lenbury Y., Uyeshima M.* Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method // *Physics of the Earth and planetary interiors.* – 2005. – № 150. – P. 3–14.
7. *Egbert G., Kelbert A.* Computational recipes for electromagnetic inverse problems // *Geophysical Journal International.* – 2012. – № 189. – P. 251–267.



УДК 550.837.211

Н. С. Голубцова^{^1}, *С. А. Вагин*^{^2}, *И. Л. Варданянц*^{^2}, *А. А. Ковтун*^{^2},
В. А. Куликов^{^1,3}, *С. Ковачикова*^{^4}, *И. Н. Лозовский*^{^5}, *П. Ю. Пушкарев*^{^1},
М. Ю. Смирнов^{^2}, *Е. Ю. Соколова*^{^4}, *Я. В. Таран*^{^1}, *Н. И. Успенский*^{^2},
Н. Л. Шустов^{^1,3}, *А. Г. Яковлев*^{^1,3}

НОВЫЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ НА ПРОФИЛЕ «ВЫБОРГ – СУОЯРВИ» ЧЕРЕЗ ЛАДОЖСКУЮ АНОМАЛИЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ*

Аннотация. Новые разведочные и глубинные МТ/МВ-зондирования выполнены в 2013–2014 годах на профиле вкост Ладожской аномалии электропроводности на юго-востоке Балтийского щита. Проведена синхронная обработка записей, оценка размерности структур, предварительные сглаживающие 1D- и 2D-инверсии. На полученных разрезах выделяются две части аномалии, при этом более проводящей является юго-западная, очевидно связанная в основном с электропроводящими минералами.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, Ладожская аномалия.

Об авторах:

^{^1} Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва.

^{^2} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург.

^{^3} ООО «Северо-Запад», Москва.

^{^4} Институт геофизики Чешской АН, Прага.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-00786-а.

⁵ *Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, Москва.*

*N. S. Golubtsova, S. A. Vagin, I. L. Vardanyants, A. A. Kovtun, V. A. Kulikov,
S. Kovachikova, I. N. Lozovsky, P. Yu. Pushkarev, M. Yu. Smirnov, E. Yu. Sokolova,
Ya. V. Taran, N. I. Uspensky, N. L. Shustov, A. G. Yakovlev*

NEW MAGNETOTELLURIC SOUNDINGS ON THE «VYBORG – SUOYARVI» PROFILE ACROSS THE LADOGA CONDUCTIVITY ANOMALY

Abstract. *New broadband and long-period MT/MV soundings were performed in 2013–2014 on the profile crossing the Ladoga conductivity anomaly in the south-eastern part of the Baltic shield. We performed remote reference data processing, evaluated dimensionality of structures, made preliminary 1D and 2D inversions. On the resulting cross-sections the anomaly splits into two parts, south-western one being more conductive, probably mainly because of electronically conducting minerals.*

Keywords: *magnetotelluric sounding, Ladoga anomaly.*

Одна из наиболее ярких коровых аномалий электропроводности, Ладожская, была выявлена в конце 1970-х годов в результате магнитовариационного профилирования [1] и затем исследована с помощью магнитотеллурических зондирований [2]. В последние годы существенно возросли возможности измерительной аппаратуры и методов обработки, анализа и интерпретации магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) данных, что позволило вернуться к задаче изучения Ладожской аномалии на новом уровне.

Аномалия располагается в юго-восточной части Балтийского щита и представляет собой протяжённую проводящую зону в кристаллическом фундаменте преимущественно северо-западного простирания. Она «выныривает» из-под осадочного чехла Русской плиты, проходит под одноименным озером и далее вглубь территории Финляндии. Есть основания полагать, что аномалия маркирует границу между позднеархейским Карельским блоком Балтийского щита, расположенным к северо-востоку, и раннепротерозойским Свекофенским блоком, находящимся на юго-западе [3]. Высокая проводимость аномалии, по всей вероятности, в первую очередь обусловлена электропроводящими минералами (графит, сульфиды), наличие которых в регионе известно по геологическим данным [4].

В 2013–2014 годах на профиле «Выборг – Суоярви» северо-восточного простирания и длиной около 200 км, проходящем вкост аномалии между Ладожским озером и территорией Финляндии, были выполнены МТ- и МВ-зондирования. В 43 точках проведены суточные измерения с помощью аппаратуры MTU-5 с использованием индукционных датчиков магнитного поля (Phoenix Geophysics, Канада), в 8 опорных точках – трёхсуточные зондирования с аппаратурой LEM1-417M и феррозондовыми магнитометрами (Львовский центр ИКИ НАНУ и НКАУ). Положение точек наблюдения показано на рис. 1.

Обработка данных проводилась в синхронном режиме, позволяющем подавить влияние локальных источников промышленных помех вблизи точек наблюдения. Синхронные записи были выполнены в базовых точках к западу от Ладожского озера в об-

серватории «Красное» (2013 г.), а также к востоку от озера (2014 г.). При обработке низкочастотных данных использовались записи финских обсерваторий.

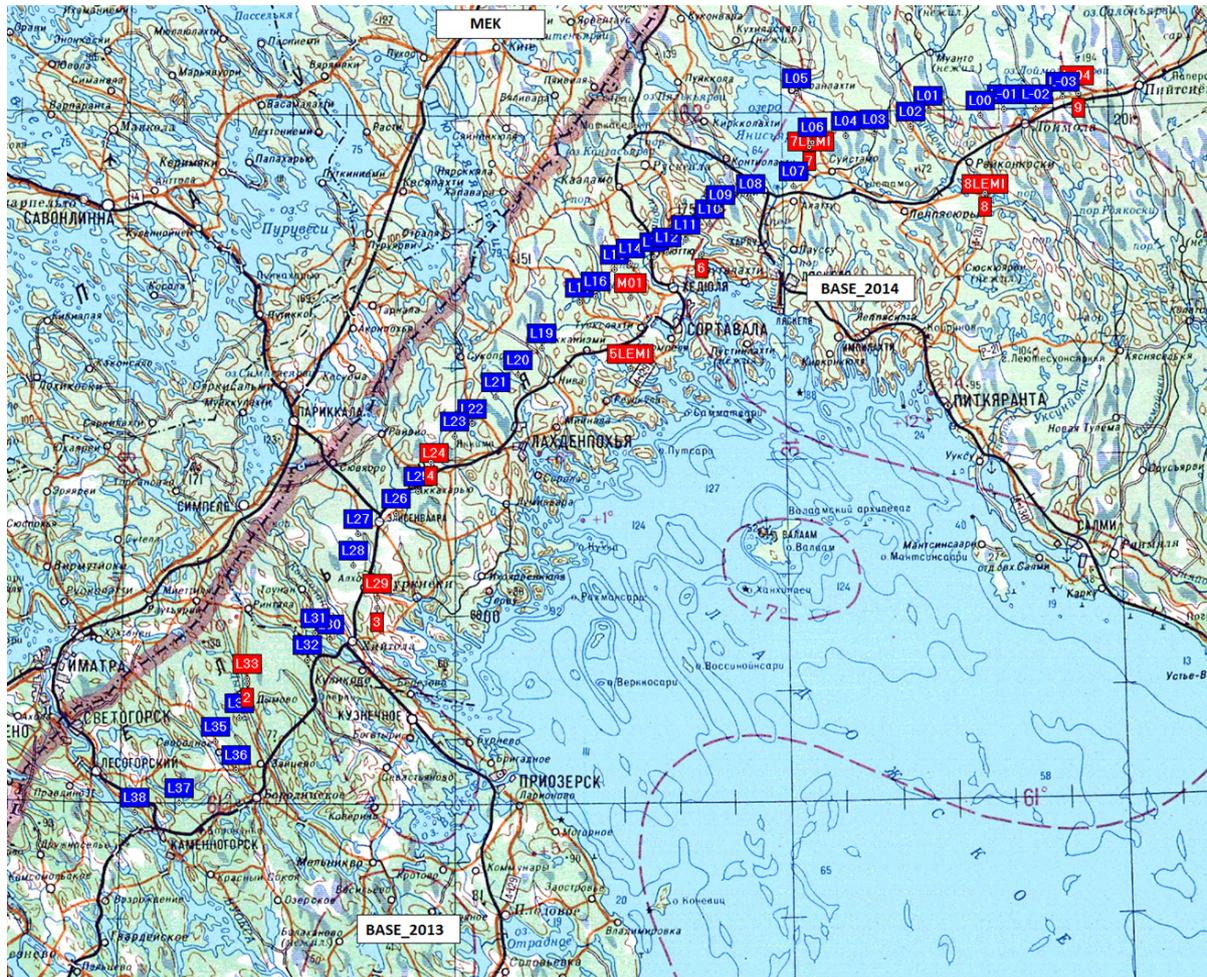


Рис. 19. Положение базовых пунктов непрерывных МТ/МВ-наблюдений в 2013 и 2014 гг. и точки рядовых пятикомпонентных зондирований: трёхсуточных с аппаратурой LEMI-417М (красный цвет) и односуточных с аппаратурой MTU-5 (красный цвет для точек, данные которых объединялись с данными трёхсуточных зондирований, и синий цвет для остальных точек)

Анализ МТ/МВ-данных [5] показал, что преимущественное простирание геоэлектрических структур – северо-западное, при этом профиль ориентирован на северо-восток по азимуту примерно 45 градусов. Таким образом, 2D-инверсия данных допустима, несмотря на присутствие локальных 3D-эффектов. Для примера на рис. 2 показана карта полярных диаграмм на профиле «Выборг – Суоярви», на рис. 3 – карта индукционных стрелок, полученных как на профиле, так и ранее в регионе.

На разрезах по результатам предварительных 1D- и 2D-инверсий МТ-данных земная кора характеризуется низким сопротивлением на большей части профиля, за исключением его северо-восточной части, примерно от 160 до 200 км профиля. Наиболее проводящая область коры отвечает участку профиля между 40 и 70 км, далее по профилю проводимость понижается, а между 120 и 160 км несколько повышается вновь. Разрез по результатам сглаживающей 1D-инверсии по программе [5] приведён на рис. 4.

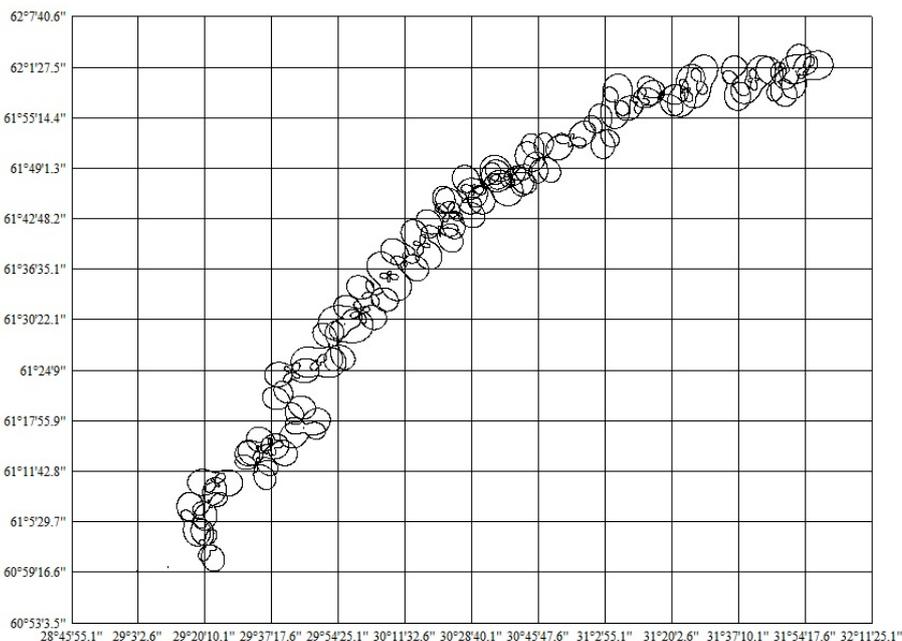


Рис. 20. Карта амплитудных полярных диаграмм тензора импеданса на профиле «Выборг – Суоярви» на периоде 10 с

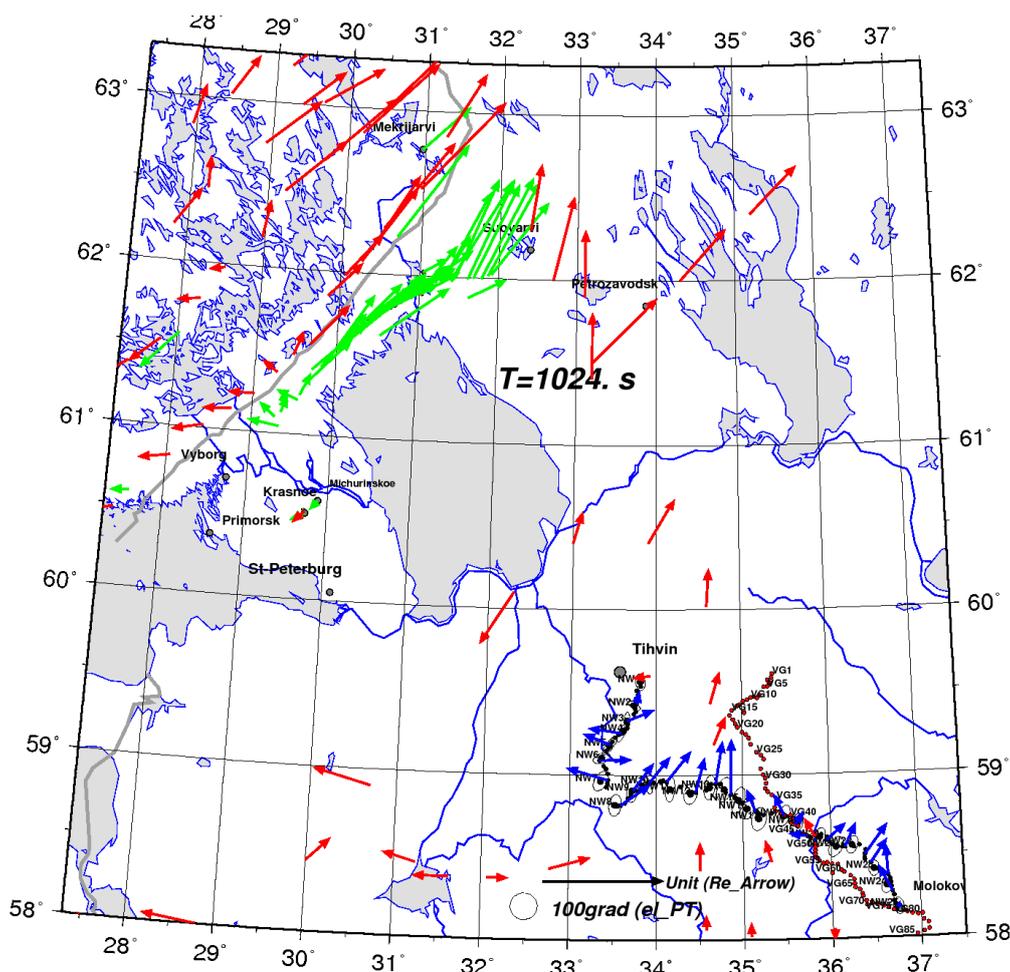


Рис. 21. Вещественные индукционные стрелки (в конвенции Визе – смотрят от проводников) на профиле «Выборг – Суоярви» (зелёный цвет), на участке профиля 1-ЕВ (синий цвет) и по материалам других исследований в регионе (красный цвет)

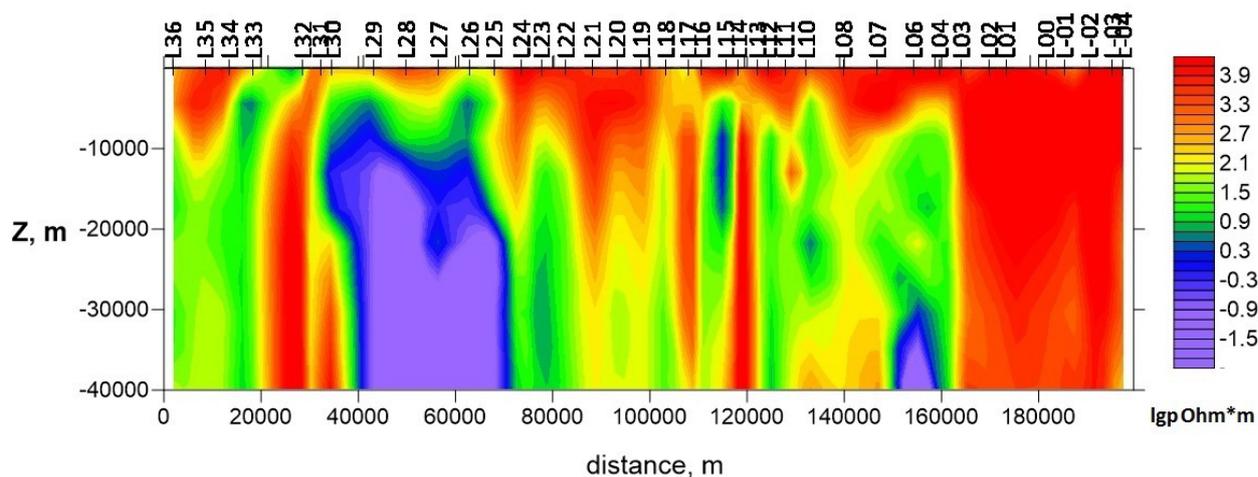


Рис. 22. Геоэлектрический разрез по линии «Выборг – Суоярви», построенный по результатам предварительной сглаживающей 1D-инверсии эффективного импеданса

Планируется проведение углубленной 2D-инверсии с использованием разных программ и параметров процедур инверсии, а также весов компонент МТ/МВ-данных. Будет выполнена объемная и пленочная 3D-инверсии данных, как с профиля «Выборг – Суоярви», так и полученных в регионе ранее.

Авторы благодарны сотрудникам ООО «Северо-Запад», принимавшим участие в полевых работах и обработке данных.

Библиографический список

1. Рокитянский И. И., Кулик С. Н., Рокитянская Д. А. Ладожская аномалия электропроводности // Геофизический журнал. – 1981. – № 3. – С. 97–99.
2. Ковтун А. А., Вагин С. А., Вардадяц И. Л. Строение коры и мантии по профилю Суоярви-Выборг по магнитотеллурическим данным // Вестник СПбГУ. – 1998. – Сер. 4. – Вып. 4. – С. 25–34.
3. Жамалетдинов А. А., Кулик С. Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофизический журнал. – 2012. – Т. 34. – № 4. – С. 22–39.
4. Миц М. В. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. – М.: ГЕОКАРТ, 2010. – Т. 1. – 408 с. – Т. 2. – 400 с.
5. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Научный мир, 2010. – 680 с.
6. Constable S. C., Parker R. L., Constable C. G. Occam's inversion; a practical algorithm for the inversion of electromagnetic data // Geophysics. – 1987. – Vol. 52. – Pp. 289–300.



УДК 550.83

Б.С. Светов^{^1}

САМОСГЛАСОВАННЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИКИ

Аннотация. Известно большое количество научных работ, посвященных рассмотрению различных модификаций электромагнитных методов разведки независимо от параллельно существующих в реальной Земле других физических полей. Такой подход в некоторых ситуациях оправдывает себя, однако в общем случае он дает лишь некоторое приближение к искомому решению задачи. Более строго интерпретация наблюдаемых данных может быть проведена в рамках решения

системы самосогласованных задач, учитывающих взаимодействие разных физических полей между собой. Каждая такая задача подобно классическим уравнениям математической физики включает в себя свое неоднородное уравнение, описывающее на макроскопическом уровне введенное поле, и уравнения связи его с другими полями. Систему таких самосогласованных задач можно рассматривать как некий аналог системы основных уравнений матфизики, приспособленный к решению задач геофизики. Обоснованию необходимости такого подхода в разведочной геофизике посвящена настоящая статья.

Ключевые слова: самосогласованные задачи, физические поля в реальной геологической среде.

Об авторах:

^{^1} Институт физики Земли РАН, Москва.

B. S. Svetov

SELF-CONSISTENT PROBLEM OF GEOPHYSICS

Abstract. *Many research papers are devoted to the consideration of various modifications of electromagnetic methods of prospecting, regardless of other physical fields coexisting in the real world. This approach, in some situations, is justified, but in general it provides only an approximation to the desired solution. A stricter interpretation of the observed data can be carried out within the framework of solving the system of self-consistent problems, taking into account the interaction of different physical fields together. Each task similar to the classical equations of mathematical physics includes its non-homogeneous equation, which describes the entered field on the macroscopic level and equations relating it to other fields. The system of self-consistent problems can be regarded as a kind of analogue of the system of major equations of mathematical physics, adapted to the solution of problems of geophysics. Justification of the necessity of such an approach in exploration geophysics is the subject of this paper.*

Keywords: *self-consistent problems, physical fields in a real geological environment.*

Часто изолированно от других физических полей рассматриваются различные модификации электромагнитных методов разведки. Такой подход не соответствует современной геофизической науке и сдерживает ее развитие. Проведенные за последние 20–30 лет исследования свидетельствуют о взаимодействии в реальной Земле различных физических полей друг с другом. Их изолированное изучение может рассматриваться лишь как некоторое приближение к действительности. Более строго взаимодействие различных макроскопически усредненных и связанных между собой силовых полей описывается в рамках теории самосогласованных задач геофизики. Горные породы (геологические среды) представляют собой сложно построенные пористые системы, состоящие из твердых минералов и внутривещной жидкости, характеризующиеся набором структурных и вещественных свойств. В таких средах под действием приложенного поля возникают и взаимодействуют между собой сторонние по отношению к приложенному полю силовые поля различной физико-химической природы. Примерами таких полей являются поля, участвующие в сейсмoeлектрических процессах [7, 12], и поля вызванной поляризации среды электрокинетической или электрохимической природы [8, 9]. Такие задачи включают в себя систему уравнений приложенного и сторонних полей и уравнений, связывающих эти поля между собой. Поскольку в этом случае часть энергии возбуждающего поля тратится на создание сторонних полей, нарушаются законы, считающиеся справедливыми для возбуждающего поля. Так, при возбуждении электрического поля нарушается закон Ома, а при возбуждении сейсмического поля – закон Гука. Приложенное поле, вообще говоря, не только порождает сто-

ронные силовые поля, но может изменить структурные и даже вещественные свойства среды [3]. Такое явление может быть связано с изменением в пористых средах содержания флюида и состава растворенных в нем солей (эффект 1-го рода). Кратко остановимся на наиболее проработанных самосогласованных задачах геофизики: сейсмoeлектрики, ограничившись эффектом 2-го рода, и вызванной поляризации, частично опуская ранее опубликованные математические подробности.

1. Вызванная поляризация геологической среды

При включении электрического поля в поляризующейся среде мгновенно (со скоростью распространения ЭМ-поля) устанавливается распределение напряженности электрического поля, соответствующее первоначально неполяризованной среде (рис. 1а). Под действием приложенного электрического поля возникает электрический ток. В вязкой поровой жидкости перенос зарядов осуществляется посредством электроосмоса. При электроосмосе ионы поровой жидкости под действием электрического поля приходят в движение и увлекают за собой саму жидкость. Величина электроосмотического течения и тока определяется электропроводностью пористой влагонасыщенной среды, которая, в свою очередь, зависит от ее петрофизических свойств (геометрии порового пространства, свойств ионосодержащей жидкости и поверхности твердого скелета пор и т. п.). В результате электроосмотического течения на входе и выходе суженных участков поровых каналов образуются соответственно избыток и недостаток положительных зарядов (повышенная и пониженная концентрации ионов в поровой жидкости) (рис. 1б). Возникшая на суженном участке поры разность концентраций растворов приводит к появлению осмотического давления (мембранный эффект). Градиент осмотического давления создает осмотическое течение, переносящее не только ионы, но и

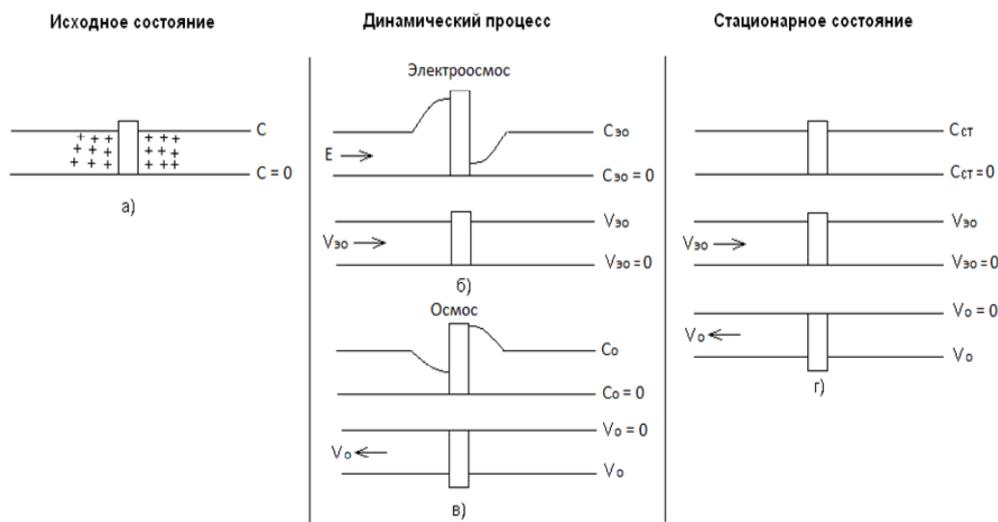


Рис. 1. Повышенная и пониженная концентрации ионов в поровой жидкости

нейтральные молекулы воды (рис. 1в). Это течение, создаваемое не зависящими от электрического поля силами осмотического давления (закон Дарси), в первом приближении не замечает мембранной перегородки и направлено в сторону увеличения создавшейся на ней неравномерной концентрации растворов, то есть противоположно электроосмотическому течению. На больших временах (в стационарном состоянии) эти течения уравнивают друг друга (рис. 1з). После выключения возбуждающего

электрического поля возникшие на мембранных перегородках перепад осмотического давления и накопленные заряды релаксируют и приводят к синхронному спаду электрического поля ВП. Для вязкой несжимаемой жидкости можно, используя формулу Гельмгольца – Смолуховского, найти значение скорости электроосмотического течения, величину стороннего тока и коэффициент поляризуемости [1].

Зависимость поля от времени установления поля ВП может быть найдена при пренебрежении конвекцией жидкости и решении краевой задачи для уравнения диффузии с заданными из решения стационарной задачи начальными условиями. Аналитические решения задачи диффузии жидкости в пористой среде находятся лишь в достаточно простых ситуациях. Так, например, решение одномерной задачи диффузии в поровом цилиндрическом канале с периодически изменяющимся диаметром и заданными начальными условиями (модель Фридрихсберга – Сидоровой – Кормильцева – Титова) имеет вид [5, 10, 11]:

$$\alpha(t, \tau) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{t}{\tau}\right), \quad \tau = \frac{(l_1 + l_2)^2}{4\pi^2 D} \quad (1).$$

Здесь $\tau = \frac{(l_1 + l_2)^2}{4\pi^2 D}$, D – коэффициент диффузии жидкости, l_1, l_2 – длины широкой и узкой частей канала. Решение представляет собой сумму экспоненциально затухающих слагаемых, показатели которых зависят от петрофизических параметров среды. Стационарное значение и скорость установления поля ВП зависят от размеров и формы пор, коэффициента диффузии поровой жидкости, вещества скелета и т. д. Время установления поляризации определяется временем формирования сторонних по отношению к электрическому полю осмотических токов, связанных с перемещением вещества (жидкости). Это определяет важную особенность установления поля ВП: оно многократно превышает время электродинамического становления ЭМ-поля в горной породе. В установившемся (стационарном) режиме и в предположении стационарности и линейности процесса поляризации самосогласованное поле электрокинетического происхождения может быть описано математически [8, 9].

2. Сейсмоэлектрическое самосогласованное поле

Теоретическую базу, на которой основана классическая сейсморазведка и акустический каротаж, составляло и составляет, в основном, до сих пор уравнение распространения упругих волн в сплошных средах – уравнение Ламе. В частотной области ($e^{-i\omega t}$) и для изотропных сред оно записывается в форме:

$$\mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} - (\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \omega^2 \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{u} – вектор смещения среды, $\lambda = K - \frac{2}{3}\mu$ и μ – параметры Ламе (μ – модуль сдвига, K – модуль всестороннего сжатия). Решение этого уравнения в однородной среде представляет собой сумму двух упругих волн: продольной (потенциальной) и поперечной (вихревой).

В 1956 году М. Био в своей основополагающей статье [13] развил эту теорию и сформулировал свои широко известные уравнения, описывающие распространение упругих волн в двухфазной – пористой влагонасыщенной (или газонасыщенной) среде, являющейся более адекватной моделью горной породы. Решение уравнений Био в однородной среде выражается в виде суммы трех волн: одной поперечной и двух продольных («медленной» и «быстрой»). Динамические и кинематические характеристики

этих волн зависят, как это следует из уравнений, не только от модулей упругости и плотностей жидкой и твердой фаз, но и от петрофизических параметров среды, прежде всего от ее пористости и проницаемости. Это открыло новые информационные возможности перед сейсморазведкой и, особенно, перед акустическим каротажем. Из уравнений Био следует, что поровая жидкость движется не синхронно с твердой фазой, а отстает от нее. В результате возникает поток жидкости относительно твердого скелета породы. Избирательная адсорбция ионов из порового раствора твердым скелетом горной породы приводит к тому, что ее жидкая и твердая фазы оказываются противоположно заряженными, поэтому их относительное движение создает сторонний электрический ток плотности \mathbf{j}^{ex} . Этот ток порождает ЭМ-поле. В этом – физическая суть сейсмoeлектрического эффекта электрокинетической природы.

В 1994 году С. Прайд в статье [12] более адекватно описал это явление с помощью самосогласованной системы уравнений, объединяющей уравнения Био и Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \overset{\vee}{\sigma} \mathbf{E} + \mathbf{j}^{ex}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{H}. \quad (3)$$

Здесь $\overset{\vee}{\sigma} = \sigma - i\omega\varepsilon$ – комплексная электропроводность среды, Связующую роль между уравнениями Био и Максвелла играет представление для стороннего тока. Оно следует из термодинамических соотношений Онзагера:

$$\mathbf{j}^{ex} = L(\omega) [\omega^2 \rho_f \mathbf{u}_s - \nabla p] = i\omega \frac{\eta\phi L(\omega)}{k(\omega)} (\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_f) = i\omega Z(\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_f), \quad (4)$$

где $L(\omega) = -\frac{\phi}{\alpha_\infty} \frac{\varepsilon_f \zeta}{\eta} \left[1 - i \frac{\omega}{\omega_b} \frac{2}{M_B} \right]^{-1/2}$, $Z = \frac{\eta\phi L(\omega)}{k(\omega)}$. Величина Z имеет смысл частотно

зависимого электрокинетического коэффициента, поскольку он определяет сторонний электрический ток, порождаемый потоком поровой жидкости. В нем заключена основная информация о среде, которую несет в себе ЭМ-поле электрокинетического происхождения.

Описанные выше задачи вызванной поляризации и сейсмoeлектрики являются важными, но все же частными примерами самосогласованных задач. Всякое силовое воздействие на геологическую среду нарушает ее равновесное состояние, порождает в ней эффекты 1-го и 2-го рода и формирует новые самосогласованные задачи. Систему таких самосогласованных задач можно рассматривать как аналог системы основных уравнений матфизики, приспособленный к решению задач геофизики. Приведем некоторые дополнительные примеры таких задач. Бурение скважин [6] нарушает существующие в недрах Земли гидродинамические связи и устанавливает новые. Проявляющаяся при бурении разность между литостатическим и гидростатическим давлениями приводит к возникновению потоков жидкости в скважину. Эти потоки порождают электрическое поле, которое измеряется в методе спонтанного каротажа. Исходя из концепции самосогласованного поля, можно представить себе появление новых геофизических методов, основанных на еще не используемых способах нарушения равновесного состояния среды. Можно, например, использовать бурящиеся скважины для регулируемой посылки в околоскважинную среду водных потоков или изменения в ней давления. Можно использовать наблюдаемые в реальной геологической среде и отличающиеся от закона Ома функциональные связи между плотностью тока и напряженностью электрического поля [4]. Можно изучать геотермические задачи, используя их зависимость от нагревания среды. Фантазия здесь ограничивается только технологическими возможностями.

Библиографический список

1. Духин С. С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. – Киев : Наукова думка, 1975. – 242 с.
2. Иванов А. Г. Сейсмoeлектрический эффект 2 рода // Известия географических и геофизических наук. – 1940. – № 5. – С. 600–727.
3. Иванов А. Г. Сейсмoeлектрический эффект первого рода в приэлектродных областях // Докл. АН СССР. – 1940. – Т. 68. С. 53–56.
4. Казначеев П. А., Камшилин А. Н., Попов В. В. Измерение локальной плотности тока в земной коре // Вестник МЭИ. – 2011. – № 5. – С. 57–63.
5. Кормильцев В. В. Вызванная поляризация в уравнениях электродинамики. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1981. – 44 с
6. Мясников А. В. Принципы построения самосогласованных гидро-геомеханических моделей для описания многофазных физических процессов в пласте и скважине // Петрофизика осадочных пород 2013 : школа-семинар.
7. Светов Б. С. К теоретическому обоснованию сейсмoeлектрического метода геофизической разведки // Геофизика. – 2000. – № 1. – С. 28–39.
8. Светов Б. С., Агеев В. В., Каринский С. Д., Агеева О. А. Самосогласованная задача вызванной поляризации электрокинетического происхождения // Физика Земли. – 2013. – № 6. – С. 91–98.
9. Светов Б. С. Самосогласованные задачи геофизики. Обзор // Физика Земли (в печати).
10. Титов К. В., Тарасов В. А. Временные характеристики вызванной поляризации в водонасыщенных песках: теория и эксперименты // Геология и разведка. – 2001. – Т. 42. – № 6. – С. 988–995.
11. Фридрихсберг Д. А., Сидорова М. П. Исследования связи явления вызванной поляризации с электрокинетическими свойствами капиллярных систем // Вестник ЛГУ. Сер. Химия. – 1961. – № 4. – С. 222–226.
12. Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // Phys. Review. B. – 1994. – V. 50. – P. 15678–15696.
13. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solids // J. Acoust. Soc. Am. – Vol. 28. – Pp. 168–186.



УДК 550.83

В. В. Спичак¹, А. Г. Гойдина¹

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ПО УДЕЛЬНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ПОРОД

Аннотация. Предложен метод восстановления продольных и поперечных сейсмических скоростей по значениям удельного сопротивления пород. На примере данных, измеренных вдоль профиля на участке в Алтае-Саянском регионе, показано, что, в зависимости от соотношения объемов имеющихся и прогнозируемых данных, точность прогноза скоростей продольных сейсмических волн изменяется в диапазоне 1–4 %, а точность прогноза скоростей поперечных сейсмических волн составляет 4–6 %. Во всех случаях наибольшие ошибки прогноза получаются при использовании максимально коррелирующих данных.

Ключевые слова: удельное сопротивление, сейсмические скорости, прогноз, нейросети.

Об авторах:

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, Москва.

V. V. Spichak, A. G. Goydina

METHOD OF RESTORING SEISMIC VELOCITIES ON ELECTRICAL RESISTIVITY OF ROCKS

Abstract. *The method of recovery of longitudinal and transverse seismic velocities on the values of resistivity of rocks is proposed. On the example of data measured along the profile at the site in the Altai-Sayan region, it is shown that, depending on the volume ratio of actual and forecast data, the forecast accuracy of the velocity of longitudinal seismic waves varies in the range of 1–4 %, and the accuracy of prediction of transverse velocities of seismic waves is 4–6 %. In all cases, the largest forecast errors are obtained by using the maximum correlated data.*

Keywords: *resistivity, seismic velocity, prediction, neural networks.*

Введение

При интерпретации результатов магнитотеллурических и сейсмических зондирований часто возникают ситуации, когда тех или иных данных недостаточно и/или они не покрывают важные участки исследуемой области. Восполнение отсутствующей информации тем или иным способом могло бы помочь в решении этого вопроса. С этой целью обычно используют прогноз недостающих значений одного параметра среды (обычно это сейсмические скорости) по значениям другого параметра (обычно это удельные сопротивления), считая для упрощения, что и те и другие зависят только от пористости (хотя на больших глубинах это может быть зависимость от температуры). Тогда, основываясь на разных формах этих зависимостей от пористости (наиболее популярными из которых являются формула Арчи для чистых песчаников и «уравнение среднего времени» соответственно), можно конкретизировать их связь и использовать ее в прогнозных целях.

В случаях, когда на большинстве пар имеющихся данных скоростей и удельного сопротивления, заданных в одних и тех же точках разреза, наблюдается высокая корреляция, можно считать оправданным построение прогнозных формул с помощью линейной или квадратичной регрессии. Поскольку, за исключением редких случаев, эти факторы заранее не известны, «слепое» использование такого подхода может приводить к существенным ошибкам при прогнозе.

Хорошей альтернативой этому подходу могут быть методы распознавания образов и, в частности, нейросетевые алгоритмы, ставшие особенно популярными в геофизике в последнее десятилетие. В обзорной работе [1] показано, что удельное сопротивление является хорошим прокси-параметром для восстановления (прогноза) данных температуры, коэффициента трещиноватости пород и решения других задач прикладной геофизики с помощью аппарата искусственных нейросетей. В частности, в статье [2] были представлены результаты нейросетевого моделирования скоростей сейсмических волн по данным удельного сопротивления и наоборот. Ниже мы приводим результаты, касающиеся восстановления сейсмических скоростей по удельному сопротивлению.

1. Данные

Рассматриваемый участок расположен в северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области (рис. 1, слева). Наблюдения методами магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и обменных сейсмических волн землетрясений (МОВЗ) были выполнены вдоль субмеридионального профиля (рис. 1, справа) [3]. На рис. 2 показан двумерный разрез до глубины 10 км, построенный по данным МТЗ [2]. Он имеет сложный характер и отражает складчатую структуру рассматриваемой области.

На рис. 3а и рис. 4а приведены разрезы скоростей продольных и поперечных сейсмических волн соответственно, построенные с помощью инверсии времен прихода обменных волн землетрясений [3]. Глубинные построения проводились в рамках бло-

ково-слоистой изотропной модели земной коры, которая, по мнению авторов последней работы, наилучшим образом соответствует характеру наблюдаемого волнового поля в вулканогенно-осадочном чехле (верхние 10–15 км).

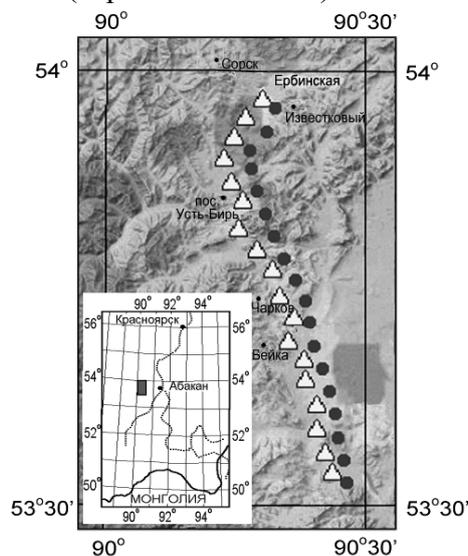


Рис. 23. Упрощенная геологическая карта участка работ [2]. Треугольниками отмечены точки МТЗ, черными кружками – точки приема сейсмических волн МОВЗ, затененный прямоугольник на внутренней вставке – участок работ

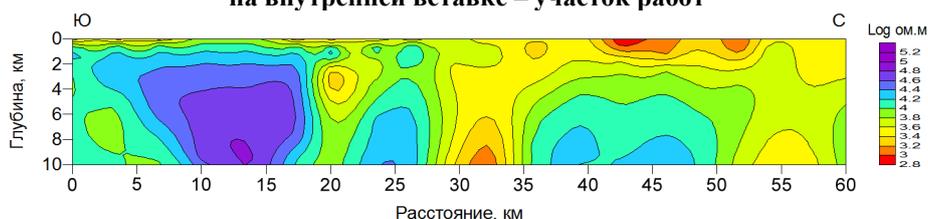


Рис. 24. Разрез удельного сопротивления вдоль субмеридионального профиля, показанного на рис. 1 [2]

2. Методика исследований

Методика исследований была основана на использовании искусственных нейросетей «с учителем», которые хорошо зарекомендовали себя при решении различных прикладных задач геоэлектрики [1]. Все исследование было разбито на два не связанных между собой исследования, которые объединяли только общие данные. С этой целью использовались наборы значений рассматриваемых параметров, предварительно интерполированных в одну и те же узлы двумерной сетки, покрывающей двумерные разрезы.

В каждом из двух случаев соответствующие данные разбивались на 2 группы: в одну из них входили данные для обучения нейросети, а в другую – оставшиеся данные, которые использовались впоследствии для тестирования (прогноза). Для исследования влияния соотношения размеров имеющихся и прогнозируемых данных на точность реконструкции искомого параметра все данные в каждом из четырех случаев разбивались в соотношении $K = 4:1$, $1:1$ и $1:4$. При этом для обеспечения большей надежности оценок данные выбирались из общего пула случайным образом, а само разбиение повторялось по 5 раз. В результате были получены оценки средних ошибок (и соответствующих стандартных отклонений) прогноза в зависимости от K .

В ходе исследования в каждой из двух групп и для каждого из значений параметра K исследовалось влияние на точность прогноза характера исходных данных, используемых для обучения нейросетей: (1) значений самих параметров, а также пространственных координат точек, в которых они заданы, (2) только самих значений этих па-

раметров и (3) подмножества данных, на которых достигаются максимальные коэффициенты корреляции рассматриваемых параметров.

Первый вариант соответствует учету не только самих значений параметров, но и (опосредованно через их зависимость от координат) других факторов, влияющих на эту зависимость. Использование расширенной информационной базы, с одной стороны, позволяет осуществлять более точный прогноз искомых параметров в рассматриваемой области, но с другой – ограничивает возможность его пространственной экстраполяции. Второй вариант, вообще говоря, обещает меньшую точность прогноза в той же области, но зато, по-видимому, может быть более успешно использован в других регионах, так как не связан с координатами (при условии сохранения там той же взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами, что заранее трудно проверить). Наконец, третий вариант моделирует часто встречающуюся на практике ситуацию, когда прогноз осуществляется по эмпирической формуле, полученной на основе коррелирующих друг с другом данных, являющихся лишь частью исходного массива информации.

3. Восстановление скоростей продольных сейсмических волн

На рис. 3 представлены разрезы скоростей продольных сейсмических волн, построенные по прогнозным значениям, усредненным по пяти случаям (в варианте 1). Вверху для сравнения представлен исходный разрез (а), а ниже (б, в и г) разрезы, построенные с помощью нейросетей, обученных на уменьшающихся объемах исходных данных ($K = 4:1$, $1:1$, $1:4$ соответственно). Сравнение разрезов показывает, что при $K = 4:1$ и $1:1$ разрезы незначительно отличаются от исходного. При $K = 1:4$ (г) появляются артефакты в приповерхностной части разреза, а также на глубинах больше 8 км, в то время как в целом горизонтально-слоистая структура определяется вполне уверенно.

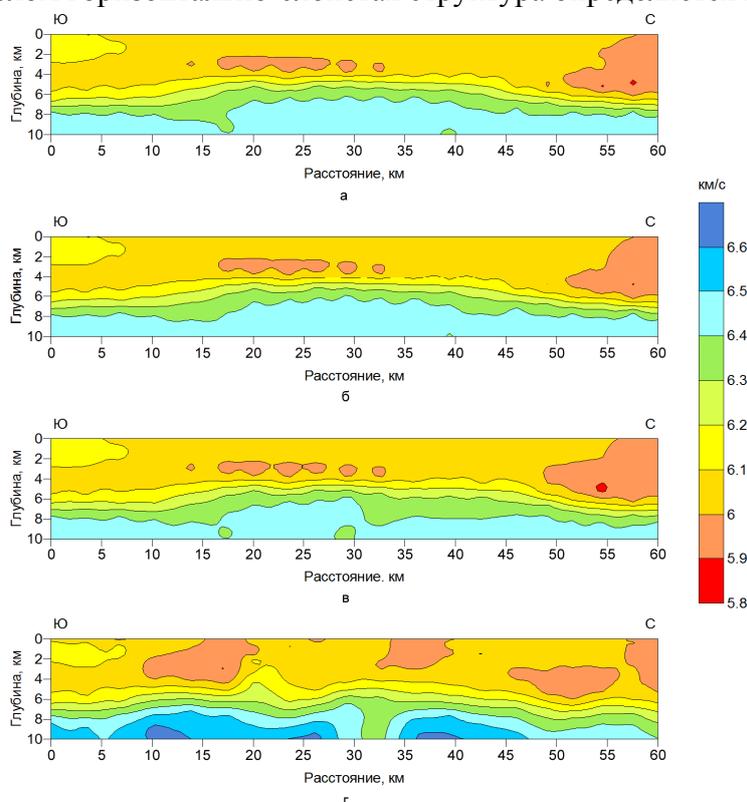


Рис. 25. Разрезы модельных скоростей продольных сейсмических волн, построенные по разрезу удельного сопротивления, при разном соотношении (K) объемов данных в обучающих и тестирующих пулах: а – исходный разрез [3], б – $K = 4:1$, в – $K = 1:1$, г – $K = 1:4$ [2]

4. Восстановление скоростей поперечных сейсмических волн

На рис. 4 представлены разрезы скоростей поперечных сейсмических волн, построенные по прогнозным значениям, усредненным по пяти наборам данных (в варианте 1). Вверху для сравнения представлен исходный разрез (а), а ниже (б, в и г) разрезы, построенные с помощью нейросетей, обученных на уменьшающихся объемах исходных данных ($K = 4:1, 1:1, 1:4$ соответственно). Сравнение разрезов показывает, что при $K = 4:1$ разрез незначительно отличается от исходного, в то время как при $K = 1:1$ и $1:4$ (разрезы в и г соответственно) на больших глубинах появляются заметные искажения структуры (хотя в целом горизонтально-слоистая структура определяется достаточно уверенно).

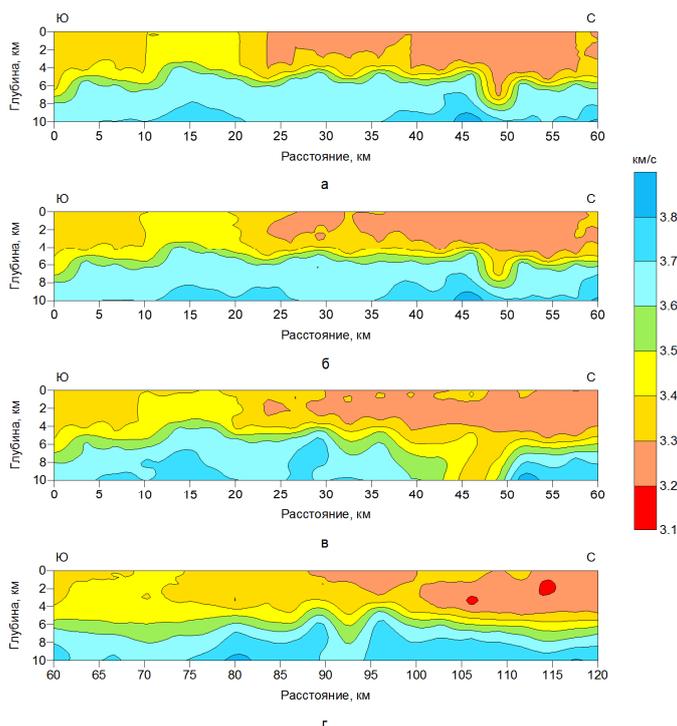


Рис. 26. Разрезы модельных скоростей поперечных сейсмических волн, построенные по разрезу удельного сопротивления, при разном соотношении (K) объемов данных в обучающих и тестирующих пулах: а – исходный разрез [3], б – $K = 4:1$, в – $K = 1:1$, г – $K = 1:4$ [2]

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Аппарат искусственных нейросетей позволяет восстанавливать значения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн по значениям логарифма удельного сопротивления. В зависимости от соотношения объемов обучающих и тестирующих данных точность прогноза скоростей продольных сейсмических волн изменяется в диапазоне 1–4 %, тогда как точность прогноза скоростей поперечных сейсмических волн составляет 4–6 %. При прогнозе с учетом координат точек, в которых заданы данные, относительные ошибки прогноза уменьшаются.

Прогнозные разрезы скоростей сейсмических волн достаточно надежно восстанавливаются, если объем неизвестных значений параметров, подлежащих восстановлению, не превышает объем имеющихся данных, используемых для обучения нейросети.

Во всех случаях ошибки прогноза по максимально коррелирующим данным дали наилучший результат. Это говорит о том, что укоренившаяся практика вывода эмпири-

ческих формул (и их последующего использования для прогноза) на основе качественной или количественной корреляции соответствующих данных может давать ошибочные результаты.

Библиографический список

1. *Spichak V. V.* Application of ANN based techniques in EM induction studies // The Earth's Magnetic Interior, IAGA Special Sopron Book Series. – Springer, 2011. – P. 19–30.
2. *Спичак В. В., Гойдина А. Г.* Нейросетевое моделирование сейсмических скоростей и удельного сопротивления пород по геоэлектрическим и сейсмическим данным, соответственно // Геофизика. – 2013. – № 3. – С. 34–44.
3. *Кадури И. Н., Белявский В. В., Егоркин А. В.* Геофизические исследования сейсморазведочными и электроразведочными методами глубинного строения Алтае-Саянской складчатой области по профилям общей протяженностью 3300 км. Организация и проведение режимных геофизических наблюдений на Тывинском полигоне : отчет : 492309. Геолфонд, 2008.



УДК 550.83

В. В. Спичак^{^1}, И. А. Безрук^{^1}, А. Г. Гойдина^{^1}, М. В. Захарченко^{^1}

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ИНВЕРСИИ ПРОФИЛЬНЫХ ТЕНЗОРНЫХ И ПЛОЩАДНЫХ СКАЛЯРНЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация. В работе предложен новый метод построения объемных геоэлектрических моделей по совокупности площадных скалярных МТ-данных и тензорных МТ-данных, заданных на секущем профиле. Разработанный алгоритм успешно опробован при построении 3D-модели сопротивления в окрестности участка регионального профиля I-СБ в Восточной Сибири. Построенная модель свободна от искажений поведения удельного сопротивления с глубиной, характерных для объемных моделей, построенных только по архивным скалярным МТ-данным, или двумерных моделей, построенных с помощью инверсии профильных тензорных МТ-данных. Предложенный подход может быть использован не только для переинтерпретации архивных скалярных МТ-данных, но и для рационального планирования региональных магнитотеллурических зондирований в будущем.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, региональные профили, архивные данные.

Об авторах:

^{^1} Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, Москва.

V. V. Spichak, I. A. Bezruk, A. G. Goydina, M. V. Zakharchenko

A METHOD OF CONSTRUCTING THREE-DIMENSIONAL GEOELECTRIC MODELS BASED ON THE COMBINED INVERSION CORE TENSOR AND AREAL SCALAR MAGNETOTELLURIC DATA

Abstract. In this paper we propose a new method of constructing volumetric resistivity models for the aggregate areal scalar and tensor MT data set on transcurrent profile. The developed algorithm is successfully tested in the construction of 3D models of resistance in the I-SAT regional profile area neighborhood in Eastern

Siberia. The constructed model is free of distortion behavior of resistivity with depth that is typical for three-dimensional models based only on archival scalar magnetotelluric data or two-dimensional models constructed using the inversion of the profile tensor MT data. The proposed approach can be used not only for the re-interpretation of archival scalar magnetotelluric data, but also for rational planning of regional magnetotelluric soundings in the future.

Keywords: magnetotelluric sounding, regional profiles, archive data.

Введение

Геофизические работы по изучению строения недр (главной составляющей которых является магнитотеллурическое (МТ) зондирование) проводятся в России вдоль региональных профилей. Несмотря на наличие развитого аппарата для анализа и двумерной интерпретации МТ-данных, эффективность использования полученной информации для поиска тех или иных месторождений при этом снижена. Это связано с рядом объективных причин: во-первых, реальная геологическая среда трехмерна и поэтому ее аппроксимация двумерными моделями может приводить к непредсказуемым ошибкам в пространственной локализации искомым объектов (как по горизонтали, так и по вертикали), существенно заниженным или завышенным значениям удельного сопротивления, а также к образованию ложных аномалий, связанных, например, с близостью профиля измерений к границам аномальных зон; во-вторых, при построении моделей используются только МТ-данные, измеренные вдоль профиля, что изначально уменьшает информационную базу процесса построения объемной геоэлектрической модели.

Несмотря на то, что сегодня существуют методы и информационно-вычислительные средства, позволяющие проводить интерпретацию данных МТ-зондирований в классе трехмерно-неоднородных сред (см., например, [1]), отсутствие площадных МТ-данных в окрестности региональных профилей или их скалярный характер не позволяли до последнего времени строить достоверные трехмерные геоэлектрические модели изучаемых объектов. Между тем проблему восполнения необходимых данных можно смягчить с помощью нейросетевых алгоритмов (см. обзорную работу [2]).

Поскольку в окрестности региональных профилей иногда имеются архивные МТ-данные (часто ограниченные по объему и качеству), то можно попытаться их использовать для построения объемной геоэлектрической модели изучаемого региона, которая учитывала бы как профильные, так и площадные данные. Ниже мы приведем алгоритм такой инверсии и продемонстрируем его работу на примере построения трехмерной модели в окрестности участка регионального профиля 1-СБ в Восточной Сибири по современным профильным (тензорным) МТ-данным с привлечением архивных площадных (скалярных) МТ-данных, имеющихся в окрестности этого профиля.

1. МТ-данные

В верхней части рис. 1 представлена карта района исследований, расположенного в юго-западной части Непско-Ботуобинской антеклизы Восточной Сибири на пересечении опорных геофизических профилей 1-СБ и 2-СБ в пределах высокоперспективных территорий на нефть и алмазы. В целом анализ геологической обстановки в районе работ свидетельствует о резко неоднородном строении земных недр и наличии глубинных разломов.

Для построения трехмерной геоэлектрической модели рассматриваемого региона использовались профильные магнитотеллурические данные (модули и фазы компонент импеданса), измеренные современной аппаратурой Phoenix на 26 периодах в диапазоне от 0,0028 с до 1219 с в 64 точках вдоль субширотного профиля 1-СБ на участке от 105 в. д. до 106 в. д. (с шагом около 2 км) (рис. 1).

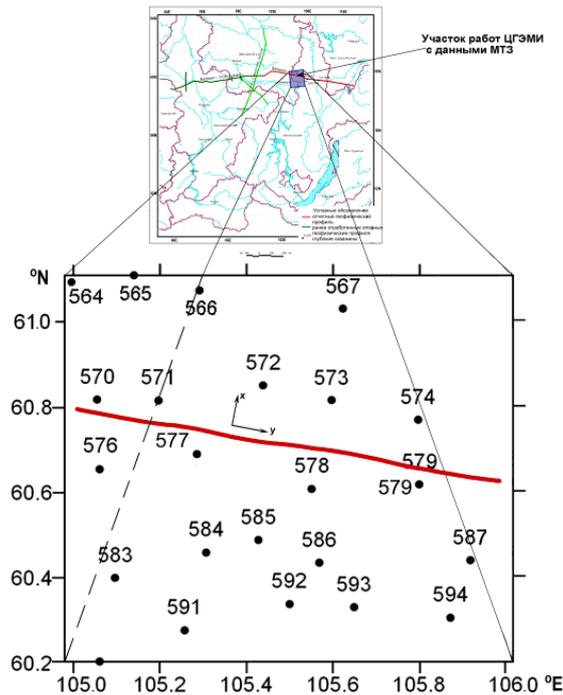


Рис. 27. Схема расположения пунктов МТЗ на площади в окрестности участка регионального профиля 1-СБ в Восточной Сибири [3]

Дополнительные данные по району исследований были получены с помощью оцифровки архивных МТ-данных, измеренных в 23 точках на площади в окрестности этого профиля (рис. 1, нижняя карта) 20–25 лет назад. В целом они весьма ограничены по полноте: представлены лишь значения Бостик-трансформации кажущегося электрического сопротивления в диапазоне периодов от 2 до 900 сек.

2. Алгоритм комбинированной инверсии скалярных и тензорных МТ-данных

Для построения трехмерной геоэлектрической модели рассматриваемой области нами был разработан метод, основанный на совместном нейросетевом анализе результатов 2D-инверсии тензорных МТ-данных на профиле и 1D-инверсии скалярных МТ-данных, измеренных в его окрестности [3]. Решение задачи сводится к следующей последовательности действий.

- Построение профилей сопротивления ρ_{1D} по скалярным МТ-данным, заданным на площади в окрестности профиля.
- Обучение искусственной нейросети (ANN_1) на массиве $\rho_{1D}(x_i, y_j, z_k)$ (вход: x_i, y_j, z_k ; выход: ρ_{1D}).
- 2D-инверсия тензорных МТ-данных, заданных на профиле, в результате которой строится разрез сопротивлений ρ_{2D} .
- Использование обученной нейросети ANN_1 для оценки значений ρ_{1D} в тех же узлах сетки, в которых определены значения ρ_{2D} , полученные в результате двумерной инверсии.

- Обучение второй искусственной нейросети (ANN_2) на соответствии значений ρ_{1D} и ρ_{2D} , заданных в одних и тех же узлах сетки двумерного разреза (ВХОД: x_i, y_j, z_k, ρ_{1D} ; ВЫХОД: ρ_{2D}).
- Оценка ρ_{3D} в узлах пространственной сетки (с помощью ANN_2) по значениям ρ_{1D} (ВХОД: x_i, y_j, z_k, ρ_{1D} ; ВЫХОД: ρ_{3D}).

3. 3D-модель кажущегося сопротивления по архивным скалярным данным

В соответствии с описанным выше алгоритмом сначала в каждой точке, где заданы скалярные МТ-данные, были построены 1D-профили кажущегося сопротивления в зависимости от кажущейся глубины. Затем массив кажущихся сопротивлений $\rho_{\text{каж}}(x_i, y_j, \omega_k)$ (где x_i, y_j – координаты точек МТЗ, ω_k – частоты), заданных на площади, был трансформирован в массив $\rho_{\text{каж}}(x_i, y_j, z_k)$ (где z_k – кажущаяся глубина, вычисляемая по соответствующей k -й частоте по известной формуле), определенный в пространстве координат.

На следующем шаге была создана искусственная нейросеть «с учителем» (ANN_1) и обучена на соответствии пространственных координат точек сетки и соответствующих кажущихся сопротивлений. На рис. 2 показана объемная модель сопротивления всей рассматриваемой области, построенная с помощью обученной нейросети ANN_1 . Из рис. 2 видны характерные особенности модели, построенной на основе скалярных МТ-данных. Это, в частности, плохое разрешение по вертикали, неизменность значений сопротивления с глубиной, а также наличие артефактов, которые не подтверждаются ни априорной информацией, ни последующим анализом, основанным на более качественных МТ-данных (см. ниже). Таким образом, построение 3D-модели сопротивления всей области только на основе скалярных МТ-данных может привести к существенным ошибкам (особенно в сложно-построенных средах).

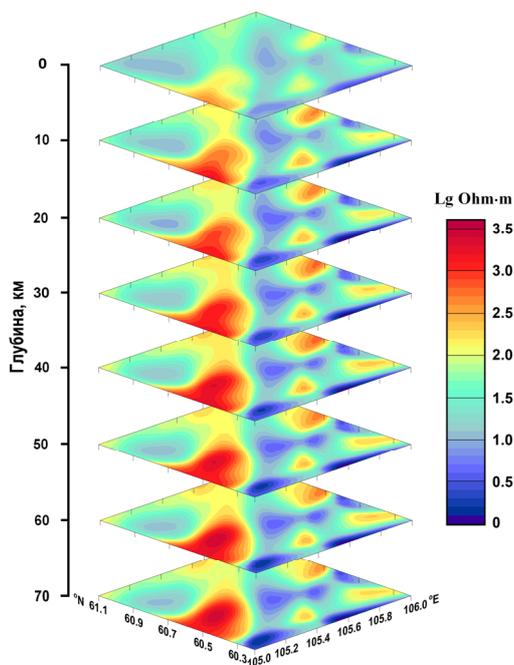


Рис. 28. Трехмерная модель кажущегося сопротивления [3]

4. 2D-инверсия тензорных МТЗ

Построение 2D-модели сопротивления вдоль участка профиля 1-СБ, изображенного на рис. 1 (нижняя часть), было осуществлено с помощью бимодальной инверсии тензорных МТ-данных. С учетом данных о геологическом строении региона исследований, ось двумерного простираения структуры была направлена перпендикулярно профилю. На рис. 3 представлен разрез логарифма электрического сопротивления вдоль участка регионального профиля. Этот геоэлектрический разрез был взят за основу при последующем построении трехмерной геоэлектрической модели с привлечением архивных МТ-данных, измеренных на примыкающей к профилю 1-СБ площади.

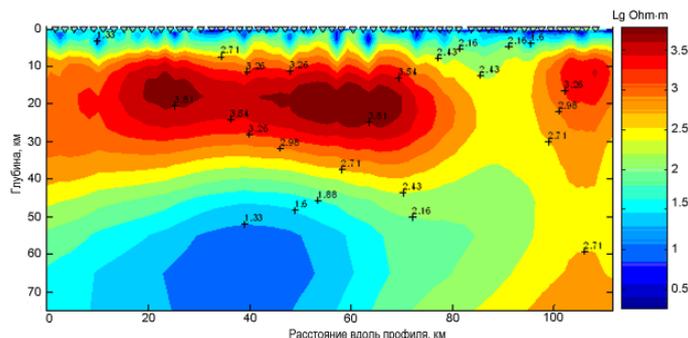


Рис. 29. Геоэлектрический разрез, построенный вдоль секущего профиля с помощью двумерной инверсии тензорных МТ-данных [3]

5. Построение 3D-модели сопротивления по совокупности профильных и площадных МТ-данных

Согласно приведенному выше алгоритму были последовательно выполнены следующие операции. Сначала с помощью искусственной нейросети ANN₁ были определены значения ρ_{1D} в тех же узлах сетки двумерного разреза, в которых ранее были определены значения ρ_{2D} . Затем была создана вторая искусственная нейросеть (ANN₂) и обучена на соответствии ρ_{1D} и ρ_{2D} в этих узлах (ошибка обучения составила 6 %). После этого обученная таким образом сеть ANN₂ была использована для прогноза значений удельного сопротивления в узлах трехмерной сетки, покрывающей всю рассматриваемую область (см. рис. 1). В результате была построена объемная модель удельного сопротивления (рис. 4), которая учитывает, с одной стороны, двумерную модель ρ_{2D} , построенную в результате бимодальной инверсии тензорных МТ-данных, измеренных вдоль профиля, а с другой – одномерные модели ρ_{1D} , построенные по скалярным МТ-данным, измеренным на площади в его окрестности. Благодаря использованной методике, эту модель можно, по существу, считать нейросетевым расширением двумерной модели в трехмерное пространство, или локально квазидвумерной объемной моделью удельного сопротивления.

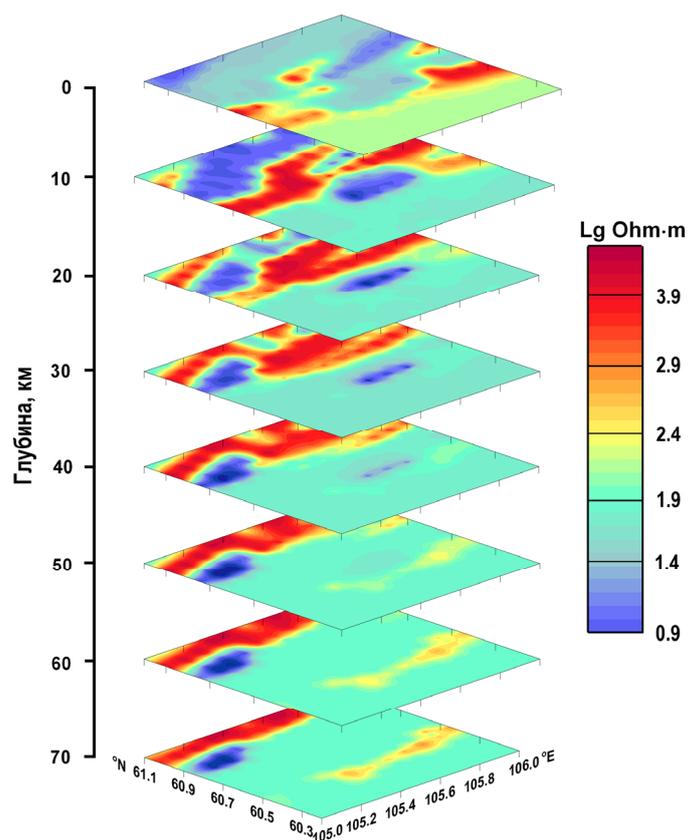


Рис. 30. Объемная модель удельного сопротивления [3]

Построенная модель свободна от искажений поведения удельного сопротивления с глубиной, характерных для объемных моделей, построенных только по архивным скалярным МТ-данным, или разрезов, построенных с помощью двумерной инверсии профильных тензорных МТ-данных. Предложенный подход может быть использован не только для переинтерпретации архивных скалярных МТ-данных, но и для рационального планирования региональных магнитотеллурических зондирований.

Библиографический список

1. Спичак В. В. Магнитотеллурические поля в трехмерных моделях геоэлектрики. – М. : Научный мир, 1999. – 204 с.
2. Спичак В. В. Применение искусственных нейросетей для анализа электромагнитных и других геофизических данных // Комплексный анализ электромагнитных и других геофизических данных. – М. : ЛИБРОКОМ, 2010. – С. 29–47.
3. Спичак В. В., Безрук И. А., Гойдина А. Г. Построение трехмерной геоэлектрической модели в окрестности участка регионального профиля 1-СБ в Восточной Сибири на основе комбинированной инверсии профильных и площадных МТ данных // Геофизика. – 2010. – № 2. – С. 54–59.



УДК 550.83+553.3

В. В. Спичак¹, А. Г. Гойдина¹, М. В. Захарченко¹

ТРЕХМЕРНАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОРСКОГО МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО КОМПЛЕКСА ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ И ДРУГИМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАНЫМ

Аннотация. Построены трехмерные модели удельного сопротивления, сейсмических скоростей и плотности участка земных недр Кузнецкого Алатау, на котором расположено Сорское медно-молибденовое месторождение. На примере их совместного анализа показано, что вероятная зона рудогенерации и область рудоотложения характеризуются пониженными значениями удельного электрического сопротивления, скорости продольных сейсмических волн, отношения скоростей V_p/V_s , а также плотности. На основе классификации пород по содержанию кремнезема построена трехмерная модель литотипов рассматриваемого участка и геолого-геофизическая модель месторождения.

Ключевые слова: эндогенные рудные месторождения, геофизические индикаторы, модель литотипов, Сорское медно-молибденовое месторождение.

Об авторах:

¹ Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Москва.

V. V. Spichak, A. G. Goydina, M. V. Zakharchenko

THREE-DIMENSIONAL GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL MODEL OF THE SORA COPPER-MOLYBDENUM COMPLEX ON ELECTROMAGNETIC AND OTHER GEOPHYSICAL DATA

Abstract. Three-dimensional models of the resistivity, seismic velocity and density of the Earth's interior region of the Kuznetsk Alatau, where Sor a copper-molybdenum deposit is located, are constructed. The example of their joint analysis showed that the probability ore production area and the area of ore deposition are characterized by reduced values of the specific electrical resistance, the velocity of longitudinal seismic waves, the V_p/V_s velocity ratio, and density. On the basis of the classification of the rocks on the content of silica a three-dimensional model of in the lithotypes considered area and geological-geophysical model of the deposit a constructed.

Keywords: endogenous ore deposits, geophysical indicators, lithotypes model, Sora copper-molybdenum deposit.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы оценить возможности геофизической разведки медно-порфировых месторождений на примере Сорского медно-молибденового комплекса (Кузнецкий Алатау) (см. его расположение на рис. 1). Для этого были построены трехмерные модели удельного сопротивления, сейсмических скоростей, плотности, а также литотипов рассматриваемого участка и проведен их сравнительный анализ.

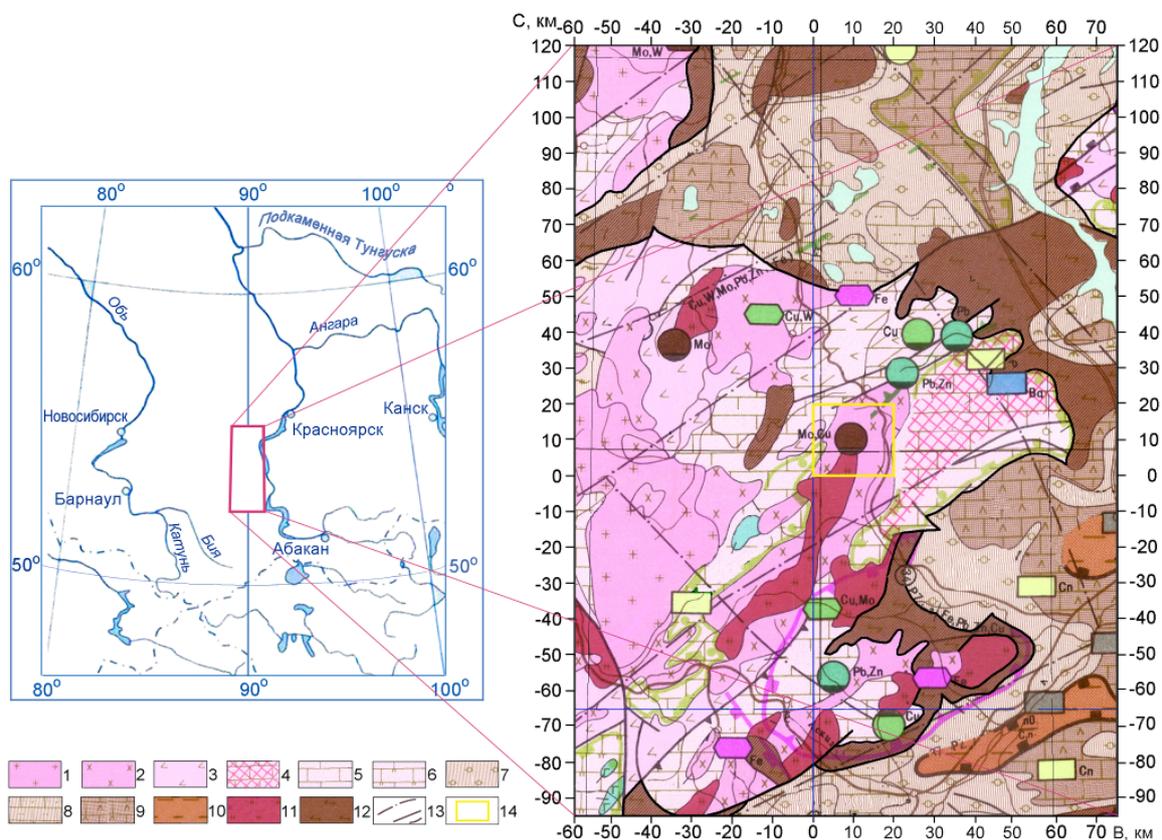


Рис. 31. Карта геологических формаций и рудных месторождений Кузнецкого Алатау [16].
Формации: 1 – гранитовая, 2 – тоналит-платогранит-гранодиоритовая, 3 – трахибазальтовая, 4 – формации кор выветривания (нерасчлененные), 5 – известковая, 6 – карбонатно-терригенно-пепловая (туффитовая), 7 – алеврито-пигановая, 8 – известняково-песчанико-алевритовая, 9 – карбонато-терригенно-пепловая, 10 – угленосная паралическая, 11 – гранитосенит-гранитовая, 12 – трахибазальт – трахиатерит – трахилинарит, 13 – разломы, 14 – участок Сорского месторождения [1]

1. Трехмерная модель удельного сопротивления

В работе [2] по данным магнитотеллурического зондирования была построена блочная модель удельного сопротивления региона. На ее основе нами построена геоэлектрическая модель участка (см. его расположение на рис. 1), включающего Сорское месторождение (рис. 2а). Ее анализ позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, фоновое удельное сопротивление среды составляет примерно 10^4 Ом·м, т. е. область в целом является высокоомной. Во-вторых, на глубинах 10–40 км выделяется листрический разлом, простирающийся в северо-западном направлении и выполаживающийся к северо-востоку на глубинах Мохо. К юго-западу от него от поверхности до глубин больше 40 км прослеживается проводящая структура, а на северо-востоке выделяется высокоомный батолит с удельным сопротивлением 10^5 – 10^6 Ом·м. На глубинах 32–37 км расположена относительно проводящая зона диаметром примерно 5 км с удельным сопротивлением в центральной части от 10 до 40 Ом·м, а на поверхности – две области с удельным сопротивлением от 40 до 150 Ом·м, соединенные каналами с удельным сопротивлением 500–1000 Ом·м с нижнекоровой аномалией.

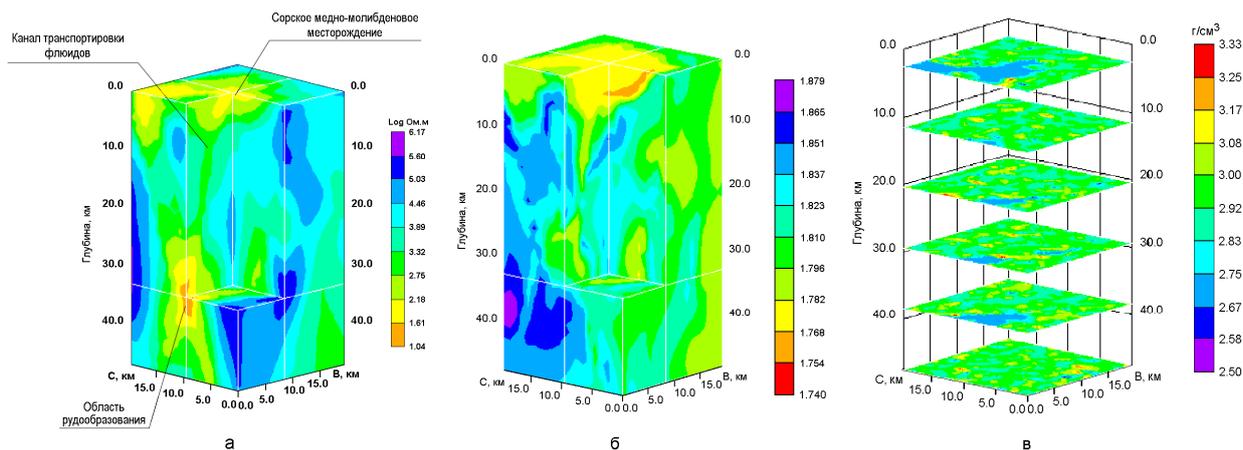


Рис. 32. Объемные модели удельного сопротивления (а), отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s (б), плотности (в) [1]

2. Трехмерные модели скоростей сейсмических волн

В работе [1] были также построены трехмерные модели скоростей продольных и поперечных сейсмических волн (V_p и V_s) по их двумерным разрезам [3]. На рис. 2б показана модель отношения V_p/V_s , которое изменяется от 1,74 до 1,88 (медианное значение составляет 1,81), что соответствует мощности консолидированной коры 43–45 км [3]. При этом в аномальных областях V_p/V_s составляет 1,77–1,78, т. е. уменьшение от медианного значения составляет примерно 2,3 %.

Сочетание уменьшения V_p/V_s и пониженных значений удельного сопротивления в нижней коре может говорить в пользу гипотезы о наличии на этих глубинах сверхкритических флюидов. Такое уменьшение отношения V_p/V_s характерно для многих приповерхностных областей рудоотложения и может быть связано со слагающими соответствующие ансамбли горных пород малоупругими минералами.

На основании сравнительного анализа аномалий удельного сопротивления и скоростей сейсмических волн можно предположить, что в нижней коре они, скорее всего, вызваны сверхкритическими флюидами и/или превалярованием пород повышенной кислотности. На небольших глубинах в верхней коре отмеченные аномалии удельного сопротивления и скоростей сейсмических волн могут быть связаны с повышенной (по сравнению с вмещающими ансамблями горных пород) концентрацией малоупругих минералов, в частности кремнезема, содержащего вкрапления рудных минералов.

В то же время относительно менее высокоомные каналы транспортировки в средней коре, соединяющие аномальные области удельного сопротивления в нижней и верхней коре (рис. 2а), практически не проявляются аномальными значениями V_p/V_s в средней коре (рис. 2б). Это может говорить о том, что на глубинах средней коры главенствуют процессы метаформизма и дифференциации, а рудоперенос осуществляется сверхкритическими флюидами и имеет, скорее всего, не объемный, а пленочный характер, не связанный с изменением упругих свойств пород (и, следовательно, скоростей сейсмических волн). Для того чтобы оценить, сопровождается ли этот процесс уменьшением плотности пород, была построена трехмерная модель плотности рассматриваемого участка.

3. Трехмерная модель плотности

Применение уравнения регрессии, полученного на основе множественной корреляции параметров V_p , V_s и V_p/V_s , позволило построить модель плотности пород рассматриваемого участка (рис. 2в). Анализ этой модели показывает, что плотность во всей рассматриваемой области изменяется от 2,50 до 3,33 г/см³ (медианное значение – 2,91 г/см³), что покрывает практически весь диапазон типов пород – от кислых до ультраосновных. При этом общее распределение плотности достаточно однородно, за исключением областей, в которых наблюдаются отмеченные выше аномалии удельного сопротивления и сейсмических скоростей. В них значения плотности составляют от 2,67 до 2,75 г/см³, что на 5,7–8,5 % меньше среднего значения.

Отмеченный дефицит плотности на глубинах нижней коры может быть вызван преобладанием кислых пород или гранитной магмы, а также указывать на гидротермально-метасоматические процессы (в частности, амфиболизации), сопровождающиеся уменьшением плотности пород. Пониженные значения плотности на небольших глубинах в верхней коре, вообще говоря, могли бы быть связаны с разуплотнением пород и флюидами, которые заполняют опережающие листрический разлом трещины и открытые поры. Однако учитывая поведение аномалий удельного сопротивления и скоростей сейсмических волн, можно сделать вывод о том, что доминирующим фактором является повышенная концентрация менее плотных минералов, в частности кремнезема с рудными вкраплениями. Для проверки высказанных выше предположений, основанных на совместном анализе аномалий физических свойств, была построена литологическая модель участка.

4. Оценка литологического состава пород по содержанию кремнезема

Оценка типов пород может быть основана на общей классификации всех магматических пород земной коры по их химическому составу и, в первую очередь, по содержанию и соотношению в породах кремнезема и щелочей. Распределение содержания кремнезема (К, %) в коре рассматриваемого участка довольно неоднородно, что характерно для молодых складчатых структур, к которым он относится. При этом преобладают значения К в диапазоне 58–65 %, что соответствует представлению о «кислой – средней» коре. При этом в верхней и, в меньшей степени, средней коре заметно присутствие базальтовых пород с $K < 54$ %, в то время как в нижней коре заметно повышение концентрации более кислых пород с $K > 65$ %, связываемое с заложением геосинклиналей в складчатых областях континентальной коры. По содержанию кремнезема можно осуществить грубую оценку преобладающих типов пород в коре, не учитывая содержание в них солей натрия и калия (рис. 3).

Анализ построенной таким образом объемной модели литологических типов пород (рис. 3) показывает, что разрез представлен, главным образом, габбро-диоритами и диоритами. На этом фоне на западе участка выделяются области, сложенные, по-видимому, преимущественно кислыми (гранитными) магмами, которые прослеживаются от глубин примерно 32–37 км, где можно предполагать расположение рудогенерирующего очага, и до поверхности.

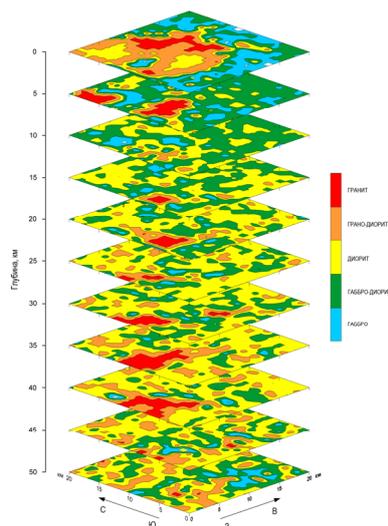


Рис. 33. Трехмерная модель литотипов пород [1]

5. Геолого-геофизическая модель месторождения

Совместный анализ построенных выше моделей позволяет определить предполагаемые области рудогенерации, транспортировки глубинных флюидов и рудоотложения. Аномальная область в низах коры характеризуется пониженными значениями логарифма удельного сопротивления, скорости продольных сейсмических волн, отношения скоростей V_p/V_s , а также плотности. На основании совокупности перечисленных признаков, а также построенной литологической модели, эта область может интерпретироваться как резервуар кислой гранитной магмы с высоким содержанием солей, образовавшейся при медленном остывании базальтовой магмы, поднявшейся из мантийных глубин до границы Мохо.

По геохимическим данным, в условиях литосферы континентальных окраин водосодержащий базальтоидный расплав поступал в кору с глубины около 70 км. Большой временной разрыв между лейкогранитами и габбро не позволяет допускать образование кислого расплава в процессе кристаллизационной дифференциации базальтоидной магмы. Можно предположить, что формирование кислой магмы происходило на нижнекоровом уровне при давлениях $>10\text{--}12$ кбар (что соответствует глубинам примерно 40 км) в связи с частичным плавлением предшествующих закристаллизовавшихся базитов. Обогащенные амфиболом породы в низах коры рассматриваются как потенциальный источник рудоносных флюидов, вовлекаемых в гидротермальный процесс на этапе развития лейкогранитов и рудоносных гранит-порфиоров.

При перемещении гранитной магмы из нижней в среднюю кору в ходе процессов компрессионной дегазации могут формироваться постмагматические сверхкритические газоводяные флюиды, способные экстрагировать из гранитных магм значительные количества металлического рудного вещества, а также обогащаться им «по дороге» в результате процессов прогрессивного и регрессивного метаморфизма вмещающих пород.

Просачивание сверхкритических газоводяных рудосодержащих флюидов через пластичную кору на глубинах нижней и средней коры может происходить благодаря скольжению пленок флюида вдоль плоскостей рассланцованных пород, например, в зонах высокотемпературных бластомилонитов, характерных для глубинных частей разломов и складчатых дислокаций. Как уже отмечалось, соответствующие каналы характеризуются несколько пониженными значениями удельного сопротивления, плотности и скоростей продольных сейсмических волн.

Наконец, в верхней коре, где пластические деформации сменяются хрупкими, может происходить смена механизма флюидного переноса от пленочного к объемному (вдоль системы крупных пор и трещин), сопровождающаяся снижением удельного сопротивления в канале транспортировки флюидов, в среднем до 300 Ом·м. На глубинах осадочного чехла рудосодержащие флюиды достигают места рудоотложения, которое характеризуется более заметным понижением удельного сопротивления (до 80 Ом·м), а также скоростей продольных волн, отношения V_p/V_s и плотности. С учетом этой совокупности аномалий физических свойств, а также построенной литологической модели, можно предполагать, что доминирующим фактором здесь является повышенная концентрация менее плотных минералов, в частности кремнезема, с включениями металлических руд, которые могут понижать объемное удельное сопротивление пород.

Библиографический список

1. Сичак В. В., Гойдина А. Г. Геофизические индикаторы эндогенных рудных месторождений (на примере Сорского медно-молибденового комплекса) // Разведка и охрана земных недр. – 2014. – № 10. – С. 47–51.
2. Белявский В. В., Гойдина А. Г. Трехмерная геоэлектрическая модель металлогенических зон Кузнецко-Алатауской складчатой области // Физика Земли. – 2012. – № 11–12. – С. 97–117.
3. Кадурин И. Н., Белявский В. В. Геофизические исследования сейсморазведочными и электроразведочными методами глубинного строения Алтае-Саянской складчатой области по профилям общей протяженностью 3300 км : отчет 487225 : Росгеолфонд, 2008.



УДК 550.837

П. О. Барсуков¹, Э. Б. Файнберг¹

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ ПЛАТО ГИЗА (ЕГИПЕТ)

Аннотация. На основе результатов импульсных электромагнитных зондирований территории Сфинкс – пирамида Хефрена (Гиза, Египет) построена 3D-модель электрических сопротивлений горных пород до глубины 150 м. Описана технология зондирований, обработки данных и дизайна модели среды как результата 3D-блоковой инверсии. На основе геологической интерпретации модели впервые определена граница палеогеновых известняков, слагающих плато пирамид, и подстилающей складчатой меловой структуры.

Ключевые слова: электромагнитные зондирования, TEM-FAST технология, 3D инверсия, геоэлектрический разрез, плато Гиза, Пирамиды, Сфинкс.

Об авторах:

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли РАН, Москва.

P. O. Barsukov, E. B. Fainberg

ELECTROMAGNETIC SOUNDING OF GIZA (EGYPT)

Abstract. Based on the results of pulsed electromagnetic sounding of the territory of the Sphinx – the Pyramid (Giza, Egypt) a 3D model of electrical resistance of rocks to a depth of 150 m is built. The technique of sounding, data processing and the environment model design as a result of 3D block inversion is described.

Based on the geological interpretation of the model the boundary of the Paleogene limestones composing the plateau of the pyramids and underlain folded Cretaceous structure is set.

Keywords: electromagnetic sounding, TEM-FAST technology, 3D inversion, geoelectric section, Giza plateau, Great Pyramids, Sphinx.

В 1994 г. в рамках совместного проекта НРИАГ (Египет) и ИФЗ РАН (Россия) [1] были проведены исследования территории Сфинкс – п. Хефрена импульсным электромагнитным методом. Расположение пирамид, Сфинкса и рельеф местности показаны на рис. 1. Целью исследований была оценка конфигурации водоносных горизонтов и резервуаров грунтовых вод и комбинирование полученных данных с результатами ранее проведённых НРИАГ вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) в окрестностях Сфинкса. Для возбуждения и измерения полей использовались квадратные совмещённые антенны размером 50×50 м и технология TEM-FAST-зондирований [2]. Отклики среды на импульсное возбуждение поля измерялись в диапазоне 4–1000 мс, что обеспечивало исследование электрического сопротивления пород в интервале глубин 5–150 м.

Одним из факторов, осложняющих измерения TEM-откликов, является наличие электрических линий и металлических объектов на исследуемой территории, способных существенно исказить данные измерений и создавать интенсивные помехи. Поэтому для контроля результатов измерений были выполнены дополнительные зондирования вдали от пирамид в незагрязнённой помехами западной части плато в пределах залегания формации Моккатам. В настоящей работе данные этих зондирований используются для изучения геоэлектрического строения и геологии разреза формации Моккатам.

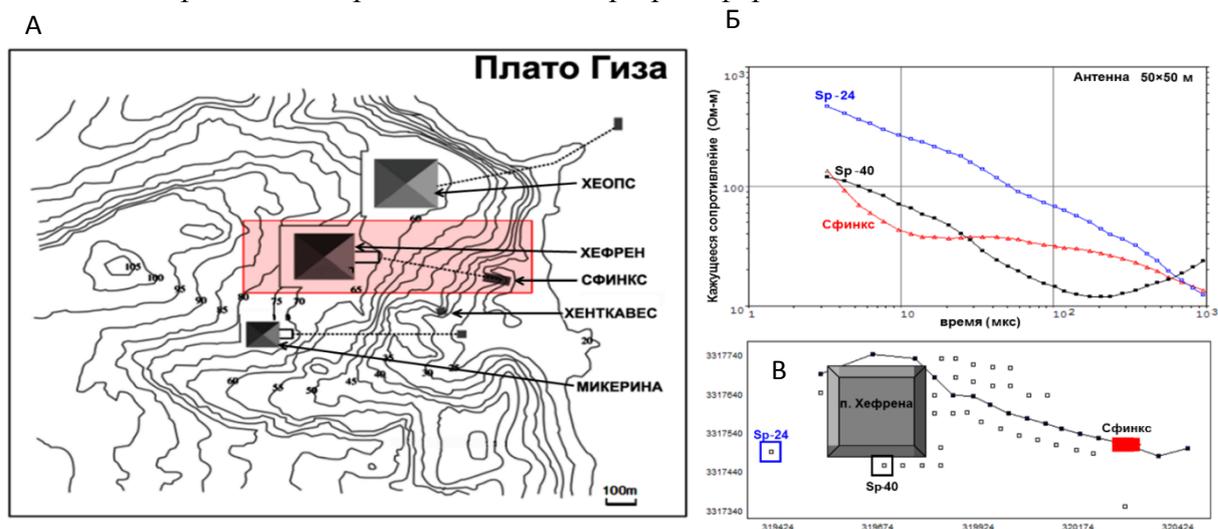


Рис. 34. Территория исследований: А – изолинии – рельеф земной поверхности (в метрах), точечные линии – подземные входы в пирамиды; Б – пункты зондирования, показанные на рис. 1В и профиль зондирования (ломаная линия), вдоль которого строился разрез; В – переходные отклики в виде кажущегося сопротивления

1. Технология TEM-FAST-зондирований

Отметим особенности технологии TEM-FAST-зондирований. Обычно после того как импульсный отклик измерен, его трансформируют в зависимость кажущегося сопротивления от времени $\rho_a(t)$, используя известную асимптотическую формулу становления поля для поздних времён. Примеры таких откликов приведены на рис. 1. Однако для построения 3D-моделей среды такой нормировки недостаточно. В технологии

TEM-FAST применяется трансформация откликов в зависимости кажущегося сопротивления от глубины исследования $\rho(h)$. Алгоритм трансформации содержит три последовательных этапа: 1) аппроксимация измеренных откликов функцией $E(t)$, представляющей собой сумму затухающих во времени экспоненциальных членов [8]; 2) вычисление сопротивления однородного полупространства $\rho(t)$, отклик от которого совпадает с $E(t)$ на всех временах t ; 3) вычисление параметрически заданной функции $\rho(h)$ для каждого параметра t .

Пример трансформаций $\rho(t)$ и $\rho(h)$ иллюстрируют рис. 2А и Б соответственно.

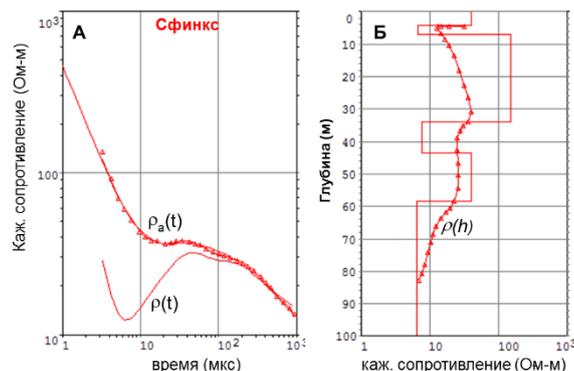


Рис. 35. А – импульсные отклики в виде кажущегося сопротивления; Б – $\rho_a(t)$ и $\rho(t)$ – зависимость кажущегося сопротивления от глубины исследования. Кусочно-однородная кривая – результат 1D-инверсии отклика, полученного при зондировании площадки под Сфинксом

Трансформации сглаживают кусочно-однородное распределение сопротивлений среды, несколько искажая значения ρ и глубины h . Тем не менее основные особенности модели сохраняются. Кроме того, важно, что при таком подходе для дизайна устойчивой трансформации не требуется никакой априорной информации об изучаемой среде; локальные 1D-трансформации $\rho(h)$, «сшитые» в 2D- или 3D-структуры, создают электромагнитный образ среды, который в 2D-варианте называется псевдо-разрезом сопротивлений.

Следующим шагом построения 3D-модели среды является проецирование трансформаций на вертикальную сетку модели, т. е. замена непрерывной функции $\rho(h)$ (рис. 3а) её ступенчатой, кусочно-однородной аппроксимацией. Количество слоёв с разными сопротивлениями может достигать нескольких десятков в зависимости от необходимой детальности исследований. Сетка анализируемой здесь 3D-модели состояла из одинаковых ячеек размером $\Delta x = \Delta y = 25$ м, $\Delta z = 2$ м. На рис. 3А показано сечение 3D-модели, «сшитой» из локальных 1D-моделей. Положение профиля показано на рис. 1Б, а экспериментальные данные и рассчитанные вдоль профиля 3D-отклики показаны на рис. 3Б, В. Видно, что невязка (rms) между наблюдаемыми и модельными данными недопустимо высока.

На следующем шаге производится 1D-инверсия откликов в рамках многослойных локальных моделей в каждой точке измерения. В качестве стартовых моделей используются ранее построенные на основе трансформаций $\rho(h)$ ступенчатые структуры. В процессе 1D-инверсии подбираются сопротивления слоистых структур, при которых минимизируется невязка между наблюдаемыми и расчётными откликами в каждой точке измерения. Дополнительным ограничением на значения сопротивлений слоёв служит дискретная шкала сопротивлений, содержащая ограниченное количество градаций (в данном случае 10). Результат 1D-инверсии вдоль профиля показан на рис. 3Б. На

верхней панели показаны экспериментальные данные и рассчитанные 3D-отклики. Видно, что невязка уменьшилась, однако по-прежнему оставляет желать лучшего.

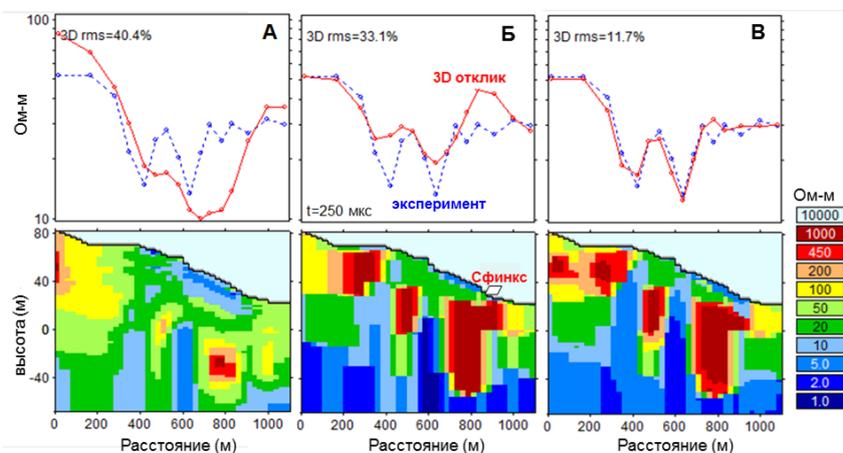


Рис. 36. Разрезы сопротивлений 3D-модели по профилю, показанному на рис. 1Б:
А – структура, созданная на основе трансформаций $\rho(h)$;
Б – структура, созданная на основе локальных 1D-инверсий;
В – результат 3D-инверсии

На заключительном этапе производится 3D-инверсия данных в рамках построенной блоковой структуры, т. е. минимизируется невязка между наблюдаемыми и модельными откликами, при этом подбираются сопротивления блоков без изменения их границ. В данном случае инверсия осуществлялась относительно 10 сопротивлений в рамках шкалы 1–1000 Ом-м. Результат показан на рис. 3В. Невязка между наблюдаемыми и модельными данными оказалась в пределах 12 % для $t = 250$ мкс. Общая невязка по всему временному диапазону $\text{rms} \sim 8$ %, что в целом соответствует погрешности данной съёмки.

Анализируя результаты инверсии на разных этапах, можно заметить, что главные особенности модели проявляются уже на начальном этапе трансформаций (рис. 3А) – это три блока с высокими сопротивлениями, разбитые субвертикальными низкоомными швами. Разрезы, представленные на панелях Б и В, принципиально не отличаются, однако их 3D-отклики более контрастны и лучше согласуются с наблюдаемыми данными.

2. Анализ геоэлектрической модели

Созданная геоэлектрическая 3D-модель показывает следующее. Сопротивление поверхностного слоя (первые 5 м) меняется в пределах от 10 до 500 Ом-м, достигая минимума восточнее Сфинкса. Этот результат полностью согласуется с данными ВЭЗ, полученными в окрестности (± 100 м) монумента. Здесь также при разnose $AB/2 < 5$ м сопротивление не превышает 20 Ом-м. Глубже идёт возрастание сопротивления пород до глубины ~ 10 м от поверхности, что также подтверждается ВЭЗ [5]. На горизонте 0 м (отсчитывается от уровня моря) центр и южное крыло территории имеют сопротивление более 200 Ом-м, в то время как северное крыло имеет сопротивление ~ 10 –20 Ом-м. В центральной части прослеживается низкоомный шов мощностью 30–50 м SW-NE-направления. На горизонте -50 м общее сопротивление пород падает до 5–10 Ом-м, за исключением двух областей. На глубоком горизонте -100 м виден единственный блок у южной грани п. Хефрена сопротивлением более 200 Ом-м, на фоне практически одно-

родной среды с сопротивлением менее 10 Ом-м. На вертикальном разрезе модели (рис. 3В) видны три блока пород с сопротивлением более 200 Ом-м, разделённые субвертикальными швами сопротивлением менее 10 Ом-м. Все блоки подстилаются толщей пород сопротивлением менее 10 Ом-м. Восточный, самый мощный блок, на котором расположен Сфинкс, прослеживается до горизонта – 50 м.

3. Геологическая интерпретация.

Как известно, плато пирамид Гиза сложено Средне-Эоценовыми известняками формации Моккатам; породы этого горизонта в регионе нигде, кроме плато, не встречаются [7]. Известняки моноклинально падают в SE-направлении под углом 5–7°. Толща Моккатам несогласно залегает на поздне меловых карбонатах, которые интенсивно смяты в результате поздне меловой тектонической активности. В работе [6] приведён фрагмент геологической карты, на которой видна сложная складчатая структура Абу-Раваш (9 км NW от плато пирамид), сложенная Меловыми породами, в пределах которой формация Моккатам отсутствует. Меловые отложения перекрыты более молодыми породами Верхне-Эоценовой Маади формацией. Мощность формации Моккатам не определена. В NW-направлении подошва Моккатам обнажается на горизонте +100 м в 2,5 км от плато пирамид. Если предположить, что подошва толщи плоская, можно оценить максимальную мощность Моккатам в основании Сфинкса (+25 м) – $H_{\max} \sim 190\text{--}280$ м при углах падения 5–7° SE соответственно. Сопротивление пород в созданной 3D-модели изменяется почти на 3 порядка, что явно противоречит предположению о том, что мы имеем дело только с латерально однородной толщей известняков. Столь резкая вертикальная неоднородность сопротивлений в модели объясняется сложным рельефом кровли подстилающей толщи Меловых отложений. Так, например, в структуре Абу-Раваш пачки пород изменяют угол и вектор падения с 15° SE на 15° NW на расстоянии ~2 км, образуя «мини-депрессию» глубиной ~250 м. Эта же складчатая структура подстилает и плато пирамид [3, 4].

Таким образом, высокоомные блоки модели сложены плотными известняками формации Моккатам и разбиты обводнённой разломной зоной SW-NE-направления. Максимальная мощность плотных известняков под южной гранью п. Хефрена (+65 м) – не менее 160 м, а вблизи Сфинкса (+25 м) ~80 м. Низкоомные подстилающие горизонты представляют собой смятые в складки трещиноватые меловые карбонаты, насыщенные минерализованными водами. В западной части плато (0,5–1 км западнее п. Хефрена), где были сделаны «калибровочные» зондирования, импульсные отклики аналогичны sp24 (рис. 2), т. е. сопротивление поверхностного слоя (25 м) $\rho > 500$ Ом-м. Далее наблюдается 100-кратное падение сопротивления до 5 Ом-м на глубине 45 м и до 1 Ом-м на глубине 70 м. Верхний слой соответствует плотным, слабопроницаемым известнякам, а подстилающая толща представлена насыщенными минерализованной водой трещиноватыми породами. Таким образом, граница высокоомных и низкоомных образований в созданной модели соответствует границе меловых и палеогеновых отложений. Схематический геологический разрез плато пирамид по линии Сфинкс – Хефрен показан на рис. 4.

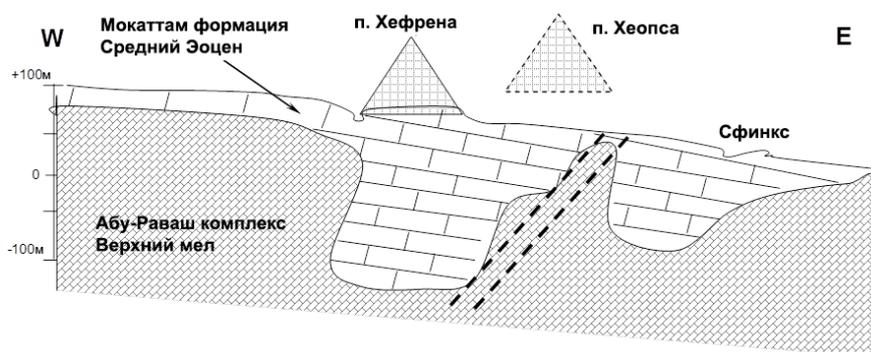


Рис. 37. Схематический геологический разрез плато пирамид. Пунктир – разломная зона

Отметим, что соответствие данных «калибровочных» измерений и откликов, полученных на основной территории исследований, свидетельствует об отсутствии существенных погрешностей ЭМ-съемки, обусловленных обилием рукотворных объектов на плато пирамид. Поверхностный (~5 м) слой Моккаттам известняков характеризуется весьма неоднородным электрическим сопротивлением, что подтверждается ВЭЗами [6]. В работах [3, 4] отмечается, что нижняя пачка формации Моккаттам (основание Сфинкса) представлена глинистыми известняками с вкраплением галита, а верхняя пачка (п. Хефрена) – массивными рифовыми известняками (биогермы). По-видимому, этим можно объяснить вариации сопротивления в приповерхностном слое плато пирамид Гиза.

Библиографический список

1. Barsukov P. O., Hassaneen A. Gh., Svetov B. S., Osman S. Sh. Geoelectrical Study in the Vicinity of Giza Pyramids, Egypt //13-th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. – Japan, 1996.
2. Barsukov P. O., Fainberg E. B., Khabensky E. O. Shallow investigation by TEM-FAST technique: methodology and case histories // Methods of geochemistry and geophysics, 40. – Elsevier, 2007. – С. 55–77.
3. Gauri K. L. Geologic study of the Sphinx // ARCE Newsletter. – 1984. – No. 127. – С. 24–43.
4. Guirand R., Bosworth W. Phanerozoic geodynamic evolution of northeastern Africa and the northwest Arabian Platform // Tectonophysics. – 1999. – № 315 (1-4). – С. 73–108.
5. NRIAG (National Research Institute of Astronomy and Geophysics). Report of the first six months of underground water monitoring at Sphinx area to Egyptian Authority of Monuments. – Egypt, 1993.
6. Raynaud S., Boisse H., Makroum F. M., Bertho J. Geological and Geomorphological study of the original hill at the base of Fourth Dynasty Egyptian monuments // Bulletin de la Societe Geologique de France. – 2010. – V. 181. – No. 3. – С. 279–290.
7. Said R. The Geology of Egypt : Amsterdam-New York : Elsevier Publishing Co., 1962. – 377 с.
8. Svetov B. S., Barsukov P. O. Transformation of the quasi-stationary transient processes in the geoelectrically equivalent waves // Physics of the Earth. – 1984. – V. 8. – С. 29–37.

АВТОРСКИЙ ДОГОВОР № _____

« _____ » _____ 20__ г.

Мы, _____

(*фамилия, имя, отчество авторов*)

являемся авторами статьи _____

и, обладая всеми авторскими правами на эту статью, передаем ее для опубликования в журнале «Вопросы естествознания» Иркутского государственного университета путей сообщения.

Мы предоставляем издателю журнала «Вопросы естествознания» ИрГУПС исключительные права на издание нашей статьи с целью выпуска ее в свет, размещения на сайте <http://irgups.ru>, реализации и распространения во всем мире.

Мы согласны на обработку наших персональных данных (сбор, систематизацию, накопление, хранение, уточнение (обновление, изменение), использование, обезличивание, блокирование, уничтожение).

Подписи всех соавторов

« _____ » _____ 20__
Дата поступления в редакцию

Подпись ответственного секретаря

**АНКЕТА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«ВОПРОСЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»**

Уважаемый автор!

Заполните, пожалуйста, эту анкету, ответив, по возможности, на вопросы в наиболее полной форме. Данная информация играет важную роль в работе редакции над Вашей статьей, разработке ее проекта и создании макета.

	Русский	Английский вариант
Фамилия		
Имя		
Отчество		
Научное звание		
Научная степень		
Должность		
Место работы		
Город		
Страна		
Телефон		
E-mail		
Веб-сайт, если имеется		

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

УДК 000000.00

← Times New Roman, 12 pt, прописные

И. И. Иванов^{^1}, П. П. Петров^{^2}, С. С. Сидоров^{^3}

← Times New Roman, 12 pt, полужирный курсив

**НАЗВАНИЕ СТАТЬИ, ОТРАЖАЮЩЕЕ ЕЕ НАУЧНОЕ
СОДЕРЖАНИЕ, ДЛИНОЙ НЕ БОЛЕЕ 12–15 СЛОВ***

← Times New Roman, 14 pt, жирный, прописные

Аннотация. Аннотация набирается одним абзацем, отражает научное содержание статьи, содержит сведения о решаемой задаче, методах решения, результатах и выводах. Аннотация не содержит ссылок на рисунки, формулы, литературу и источники финансирования. Рекомендуемый объем аннотации – от 100 слов, максимальный – не более 300 слов.

Ключевые слова: список из нескольких ключевых слов (7–10) или словосочетаний, которые характеризуют работу.

← Times New Roman, 10 pt, курсив, выравнивание по ширине, отступ первой строки 1 см

Об авторах:

^{^1} Научная степень, научное звание, должность, место работы, город, e-mail.

^{^2} Научная степень, научное звание, должность, место работы, город, e-mail.

^{^3} Научная степень, научное звание, должность, место работы, город, e-mail.

← Times New Roman, 10 pt, курсив, выравнивание по ширине, отступ первой строки 1 см

Введение

При создании документа необходимо выставить поля: верхнее – 20, нижнее – 30, левое – 25, правое – 25 мм. Основной текст работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 pt, с выравниванием по ширине, с одинарным межстрочным интервалом, с абзацным отступом в 1 см, одинаковым по всей работе. Набирать текст следует в режиме автоматической расстановки переносов (пункт меню *Сервис – Язык – Расстановка переносов – Автоматическая расстановка переносов*). Заголовки в тексте набираются шрифтом Times New Roman, 12 pt, полужирным, нумеруются по порядку (кроме введения и заключения) и выравниваются по левому краю. При наборе заголовков отбивается от основного текста одним пробелом. В заголовках недопустимы переносы и не ставится точка в конце.

Инициалы в тексте располагаются перед фамилией. В тексте используются только полиграфические кавычки « ». После каждой точки, запятой, двоеточия, тире следует пробел. Выделения в тексте должны быть единообразны по всему тексту. Подписи к иллюстративному материалу, сноски, примечания набираются по всей работе одним шрифтом, на 2 пункта меньше основного, т. е. 10 pt. Схемы и рисунки необходимо вставлять в текст, используя меню *Вставка – Объект*.

* Работа выполнена при финансовой поддержке... (указать название и номер гранта).

1. Рисунки

Вставляются в документ целиком (не ссылки). Рекомендуются черно-белые рисунки с разрешением 300 dpi. Подрисовочная подпись формируется как надпись (*Вставка*, затем *Надпись*, без линий и заливки). Надпись и рисунок затем группируются, и устанавливается режим обтекания объекта «вокруг рамки». Надписи на рисунках и подрисовочные подписи должны быть выполнены шрифтом Times New Roman, 10 pt, полужирным. Точка в конце подрисовочной подписи не ставится. На все рисунки в тексте должны быть ссылки (рис. 1).

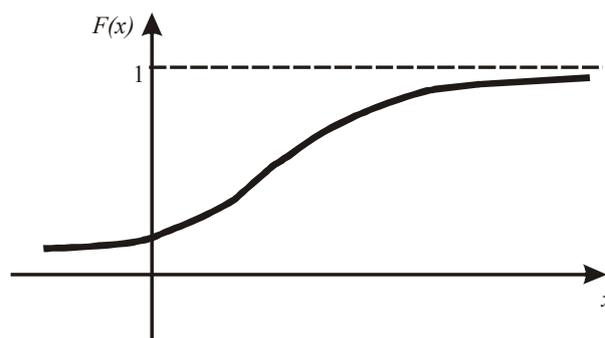


Рис. 1. График $F(x)$ для непрерывной СВ

Все разделительные линии, указатели, оси и линии на графиках и рисунках должны иметь толщину не менее 0,5 pt и черный цвет. Эти рекомендации касаются всех графических объектов и объясняются ограниченной разрешающей способностью печатного оборудования.

2. Формулы

Набираются с использованием редактора формул **Microsoft Equation 3** со следующими установками: стиль математический, элементы формулы выполняются *курсивом*; для греческих букв и символов назначать шрифт Symbol, для остальных элементов – шрифт Times New Roman (использование букв кириллицы в формуле нежелательно). Размер символов: обычный – 12 pt, крупный индекс – 7 pt, мелкий индекс – 5 pt, крупный символ – 16 pt, мелкий символ – 12 pt. Формулы располагаются по центру строки. Все математические символы в тексте необходимо набирать с помощью редактора формул. Выключенные формулы должны быть выровнены по центру. Формулы, на которые есть ссылка в тексте, необходимо пронумеровать (сплошная нумерация). Расшифровка обозначений, принятых в формуле, производится в порядке их использования.

Например, пусть A, B, C – три попарно несовместных события. Тогда

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C). \quad (1)$$

Аналогично получим более общее равенство (строго говоря, надо применить метод математической индукции). Пусть A_1, \dots, A_n – попарно несовместные события, тогда

$$P\left(\sum_{k=1}^n A_k\right) = \sum_{k=1}^n P(A_k). \quad (2)$$

Отметим, что размер и начертание математических символов внутри выключенных и строчных формул, на рисунках и подрисовочных подписях, а также в таблицах должны совпадать с размером и начертанием этих же символов внутри основного текста.

3. Таблицы

Таблицы создаются с помощью редактора таблиц MS Word. Над таблицей пишется слово «Таблица», Times New Roman, 10 pt, затем пробел и ее номер, выравнивание по правому краю. Название таблицы пишется над таблицей по центру строки, Times New Roman, 10 pt, полужирный. Далее без абзацного отступа следует таблица. На все таблицы в тексте должны быть ссылки (например, табл. 1). Если таблица не вмещается в одну страницу, то на следующей странице набирается подзаголовок «Продолжение таблицы 1», «Окончание таблицы 1», текстовая шапка таблицы при этом повторяется (или нумеруется каждая колонка таблицы и на последующих страницах повторяются только эти номера). Все колонки должны иметь заголовки и быть разделены вертикальными линиями. Цифровой материал по строкам должен быть размечен горизонтальными линиями. Содержание таблицы набирается Times New Roman, 10 pt.

Таблица 1

Значение вероятности $P_{100}(20)$, вычисленной по различным формулам			
p	$P_{100}(20)$ (по формуле Бернулли)	$P_{100}(20)$ (по формуле Муавра – Лапласа)	$P_{100}(20)$ (по формуле Пуассона)
0,3	0,007576	0,008049	0,01341
0,16	0,05674	0,06000	0,05591
0,1	0,00117	0,00051	0,00186

4. Список использованных источников

Источники располагаются в порядке цитирования. Рекомендуется придерживаться ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Пример ссылок на цитируемые источники: [1], [1, 2], [1, 2–4], [2, с. 3–5].

Библиографический список ← Times New Roman, 12 pt, полужирный, по центру

1. Первый А. А. Книга одного автора / А. А. Первый. – М. : Наука, 1971. – 1032 с.
2. Описание книги под редакцией / А. А. Первый, Б. Б. Второй ; под ред. В. В. Третьего. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1981. – 250 с.
3. Многотомное издание : в 3 т. / под ред. А. А. Первого. – М. : Наука, 1975. – Т. 1. – 392 с.
4. Первый А. А. Статья в периодическом издании трех авторов / А. А. Первый, Б. Б. Второй, В. В. Третий // Название журнала. – 2004. – Т. 104. – № 1. – С. 8–12.
5. Первый А. А. Название статьи в сборнике университета / А. А. Первый // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2003. – Вып. 4. – № 8 (24). – С. 1–3.
6. http://zhurnal.ape.relarn.ru/_abc/cit.html.
7. Первый А. А. Название диссертации : дис. ... д-ра техн. наук / А. А. Первый. – Челябинск, 2000. – 300 с.
8. Первый А. А. Название автореферата диссертации : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А. А. Первый. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 32 с.

← Times New Roman, 10 pt, (ГОСТ Р 7.0.5-2008)

В конце текста работы необходимо разместить название, аннотацию и список ключевых слов на английском языке. Эти сведения будут опубликованы вместе с работой.

I. I. Ivanov, P. P. Petrov, S. S. Sidorov
Noncentrosymmetric Oxide Crystals: Interrelationship between Structure and Acentric Properties

Abstract. *Noncentrosymmetric oxide crystals ...*

Keywords: *crystals, centers, mechanisms.*

ВОПРОСЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

№ 2 (10)
2016

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск *Е. М. Лыткина*

Подписано в печать 15.10.2015. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,5.
Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 500 экз. Заказ №

ISSN 2308-6335

Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
Отпечатано в типографии ООО «ПРИНТ-2»
г. Ижевск