

ВОПРОСЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 1 (9)

2016

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 – ф. 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!

Журнал публикует статьи по следующим направлениям:

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/title_about.asp?id=51245.

Адрес редакции: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
E-mail: v.estestvozn@gmail.com, тел. (3952) 63-83-10, доп. 0263

Журнал издается с 2013 г.
Периодичность – 4 раза в год.

Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщения

СОДЕРЖАНИЕ

ДЛЯ АВТОРОВ	6
-------------------	---

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Базилевский М.П.</i> Сведение задачи выбора спецификации модели парной регрессии к задаче поиска глобального минимума	9
<i>Кидяров Б.И.</i> Структурно-физическая систематизация ацентричных кристаллов боратов	16
<i>Марюхненко В.С., Мудрая Н.Г.</i> Физико-технические аспекты изменения сопротивления балласта железнодорожных путей	25

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Некрасова Д.О., Заяц Д.В.</i> Определение ресурсного потенциала и некоторых числовых показателей майника двулистного	37
<i>Илларионов А.И., Илларионова Е.А., Сыроватский И.П.</i> Спектрофотометрическое определение пирлиндола	43

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Агеев В.В.</i> О сторонних токах в электрокинетических процессах	51
<i>Ингеров И.А., Рудак Т.В., Ермолин Е.Ю.</i> О своевременности внедрения в практику картировочных и поисковых работ метода ЧЭЗ	54
<i>Петруняк Г.М.</i> Углеродородно-минеральный метасоматоз украинских Карпат	59
<i>Варенцов Ив.М., Иванов П.В., Аудио У., Смирнов М.Ю.</i> Совместная 3d инверсия мт/мв данных, имитированных в модели <i>comtemi-3d3</i>	69
<i>Варенцов И.М., Лозовский И.Н.</i> Комплексование разведочной и длиннопериодной аппаратуры при проведении синхронных мт/мв зондирований литосферы	74
<i>Агеенков Е.В., Легайдо П.Ю.</i> Изучение параметров вызванной поляризации одномерных сред при индукционном возбуждении и приёме электромагнитного поля	79
<i>Алексеев Д.А., Нурмухамедов А.Г., Чернев И.И., Яковлев А.Г.</i> Трёхмерная геоэлектрическая модель мутновского месторождения парогидротерм	86
<i>Белявский В.В.</i> Геоэлектрическая модель шагонарского очага землетрясений (алтае-саянский регион)	89
<i>Бессмертный С.Ф.</i> Прогнозирование площадей локализации кимберлитопроявлений на территории якутской алмазонасной провинции по результатам изучения геоэлектрического строения земной коры магнитотеллурическими зондированиями	95
<i>Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Ильин А.И., Агафонов Ю.А., Поспеев А.В.</i> Стадийность постановки электроразведочных работ на примере Ковыктинского ГКМ	100
<i>Великин А.Б., Великин А.А.</i> Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами <i>stem</i> для электромагнитного зондирования недр при поисках углеводородного сырья	103

<i>Грецов Г.А., Эпов М.И., Антонов Е.Ю.</i> Алгоритмы и программы для преобразования данных зондирований становлением поля в пространство решений волнового уравнения	115
<i>Давыденко А.Ю.</i> Интерпретация геофизических данных с использованием технологии geliosmi	120
<i>Егоров И.В., Пальшин Н.А.</i> Учет электрических шумов, генерируемых волнами на водной поверхности	124
<i>Ермолин Е.Ю., Ингеров О., Савичев А.А.</i> Опыт применения амт-мвп при картировании золотоносных кварцевых жил на Чукотке	131
<i>Ингеров И.А., Рудак Т.В., Ермолин Е.Ю.</i> Выполнение электромагнитных исследований на мелководных акваториях (шельф и транзитные зоны)	136
<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	142
ФОРМА АВТОРСКОГО ДОГОВОРА	147
ФОРМА АНКЕТЫ АВТОРОВ	148
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ	149

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 519.237.5

М.П. Базилевский^{^1}

СВЕДЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СПЕЦИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ПАРНОЙ РЕГРЕССИИ К ЗАДАЧЕ ПОИСКА ГЛОБАЛЬНОГО МИНИМУМА

Аннотация. Настоящая статья посвящена проблеме выбора спецификации модели парной регрессии. Одним из самых эффективных способов решения этой проблемы является ёмкий по времени экспериментальный способ, основанный на переборе различных вариантов моделей и выборе лучшей из них по некоторому заданному критерию. В стремлении миновать процедуры переборного характера при выборе спецификации, на примере модели регрессии с двумя независимыми переменными предложена модификация функции, подлежащей минимизации по методу наименьших квадратов. Установлено, что модифицированная функция имеет два локальных минимума, соответствующих двум моделям парной регрессии с первой и со второй независимой переменной. Решение задачи поиска глобального минимума модифицированной функции дает лучшую по величине суммы квадратов остатков регрессию. Полученные результаты продемонстрированы на примере моделирования расходов на непродовольственные товары в зависимости от доходов потребителя.

Ключевые слова: модель регрессии, спецификация, метод наименьших квадратов, глобальный минимум.

Об авторе:

^{^1} К. т. н., доцент кафедры «Математика» Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, e-mail: mik2178@yandex.ru.

M.P. Bazilevskiy

REDUCING THE TASK OF SELECTION REGRESSION MODEL SPECIFICATION TO THE TASK OF FINDING THE GLOBAL MINIMUM

Abstract. This article is devoted to the task of selection pair regression model specification. One of the most effective ways to solve this problem is by short-time experimental method based on trying different models and choosing the best of them on some predetermined criterion. In an effort to bypass the procedure of exhaustive search in the selection of specifications, as an example regression model with two independent variables function modification is proposed to be minimized by the least squares method. It was found that the modified function has two local minima corresponding to two models of regression to the first and to the second independent variable. Solving of the task of finding the global minimum of the modified function gives the best value for the sum of squared residuals regression. By example non-food products costs, depending on the income of consumer the results were demonstrated.

Keywords: regression model, specification, least square method, global minimum.

Введение

Начальным и, возможно, важнейшим этапом эконометрического исследования является этап спецификации модели, предполагающий выбор состава и математической формы связи между переменными в уравнении регрессии [1–3]. От того, насколько

ко удачно будет решена эта проблема, решающим образом зависит успех всего эконометрического исследования. При этом в парной регрессии спецификация модели связана, в первую очередь, с выбором вида математической функции, а во множественной – также с отбором наиболее существенных факторов, включаемых в модель [4, 5].

В модели парной линейной регрессии выбор вида математической функции $y = f(x)$ может быть осуществлен тремя способами [5]:

- 1) графическим;
- 2) аналитическим;
- 3) экспериментальным.

Графический способ базируется на построении диаграммы рассеивания и визуальном выборе типа кривой, проходящей таким образом, чтобы расстояния между наблюдаемыми точками и этой кривой были бы минимальными. Аналитический способ основан на изучении материальной природы связи исследуемых признаков. Экспериментальный способ, как самый эффективный, подразумевает построение и сравнение разных моделей по величине остаточной дисперсии. Недостатком экспериментального способа является то, что в его основе лежат переборные процедуры, поэтому его реализация на практике представляет собой сложную вычислительную задачу. Разумеется, современные компьютеры в силах справиться с ней, но в некоторых случаях на это может потребоваться слишком много времени.

Целью данной статьи является попытка свести задачу выбора спецификации модели парной регрессии, которая зачастую решается с помощью обыкновенного перебора различных вариантов моделей, к задаче, дающей то же самое решение без перебора.

1. Постановка задачи

Пусть изучается взаимозависимость между двумя количественными признаками y и x . В результате n опытов или наблюдений получены пары чисел: (x_i, y_i) , $i = \overline{1, n}$. Предположим, что исследователь пытается определить, какое из двух уравнений регрессии лучше описывает исходные данные:

$$y = a_0 + a_1 f_1(x) + \varepsilon_1 \quad (1)$$

или

$$y = c_0 + c_1 f_2(x) + \varepsilon_2, \quad (2)$$

где a_0, a_1, c_0, c_1 – неизвестные параметры; $f_1(x)$ и $f_2(x)$ – некоторые преобразования одной переменной x или двух переменных x_1 и x_2 , например, x^2 и $\ln x$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – ошибки моделей, которые требуется минимизировать.

Сравнивать регрессии (1) и (2) можно по величине суммы квадратов остатков, рассчитанной для каждой модели:

$$RSS = \sum_{i=1}^n e_i^2,$$

где e_i – остаток модели, т. е. разница между фактическим значением y_i и расчетным по регрессии значением \hat{y}_i . Чем меньше величина RSS , тем выше качество регрессии.

Безусловно, поставленная задача легко и быстро решается методом перебора. Регрессии (1) и (2) являются нелинейными по факторам, но линейными по параметрам, поэтому каждую из них можно оценить обычным методом наименьших квадратов (МНК) и выбрать из них лучшую по величине суммы квадратов остатков. Но еще раз

подчеркнём, что целью настоящей статьи является попытка свести поставленную задачу к задаче, которая может решаться без переборных процедур.

2. Модификация метода наименьших квадратов

Рассмотрим модель множественной линейной регрессии с двумя переменными:

$$y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где b_0, b_1, b_2 – неизвестные параметры; ε_i – ошибка регрессии; $x_1 = f_1(x)$, $x_2 = f_2(x)$ – преобразования одной переменной x или двух переменных x_1 и x_2 .

Для нахождения оценок неизвестных параметров модели (3) традиционно применяется МНК, состоящий в минимизации суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений переменной y от расчетных значений \hat{y} :

$$S(b_0, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i})^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Минимизация функции (4) дает единственные оценки параметров модели (3) \hat{b}_0 , \hat{b}_1 и \hat{b}_2 . Для решения поставленной нами задачи выбора спецификации требуется оценивать модель (3) по МНК так, чтобы только одна из оценок \hat{b}_1 или \hat{b}_2 оказывалась равной нулю. Для этого предлагается заменить традиционную для МНК функцию (4) на модифицированную функцию следующего вида:

$$S(b_0, b_1, b_2, d) = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i})^2 + M(d^2b_1^2 + (1-d)^2b_2^2) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где M – заранее выбранное большое положительное число; d – вспомогательная переменная.

Найдем экстремумы функции (5). Необходимые условия существования экстремума имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i}) = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i})x_{1i} + 2Md^2b_1 = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial b_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i})x_{2i} + 2M(1-d)^2b_2 = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial d} = 2Mdb_1^2 - 2M(1-d)b_2^2 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из условий (6), опуская индексацию, получим систему четырех нелинейных уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\begin{cases} nb_0 + (\sum x_1)b_1 + (\sum x_2)b_2 = \sum y, \\ (\sum x_1)b_0 + (\sum x_1^2 + Md^2)b_1 + (\sum x_1x_2)b_2 = \sum x_1y, \\ (\sum x_2)b_0 + (\sum x_1x_2)b_1 + (\sum x_2^2 + M(1-d)^2)b_2 = \sum x_2y, \\ db_1^2 - (1-d)b_2^2 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

После деления на n система (7) принимает вид:

$$\begin{cases} b_0 + \bar{x}_1 b_1 + \bar{x}_2 b_2 = \bar{y}, \\ \bar{x}_1 b_0 + \left(\frac{\bar{x}_1^2}{n} + \frac{Md^2}{n} \right) b_1 + \bar{x}_1 \bar{x}_2 b_2 = \bar{x}_1 \bar{y}, \\ \bar{x}_2 b_0 + \bar{x}_1 \bar{x}_2 b_1 + \left(\frac{\bar{x}_2^2}{n} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) b_2 = \bar{x}_2 \bar{y}, \\ db_1^2 - (1-d)b_2^2 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Выразим из первого уравнения системы (8) неизвестную b_0 и подставим её во второе и третье уравнение:

$$\begin{cases} \left(\frac{\bar{x}_1^2}{n} - (\bar{x}_1)^2 + \frac{Md^2}{n} \right) b_1 + (\bar{x}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_1 \bar{x}_2) b_2 = \bar{x}_1 \bar{y} - \bar{x}_1 \bar{y}, \\ (\bar{x}_1 \bar{x}_2 - \bar{x}_1 \bar{x}_2) b_1 + \left(\frac{\bar{x}_2^2}{n} - (\bar{x}_2)^2 + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) b_2 = \bar{x}_2 \bar{y} - \bar{x}_2 \bar{y}, \\ db_1^2 - (1-d)b_2^2 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Перепишем систему (9) в виде

$$\begin{cases} \left(D_{x_1} + \frac{Md^2}{n} \right) b_1 + K_{x_1 x_2} b_2 = K_{x_1 y}, \\ K_{x_1 x_2} b_1 + \left(D_{x_2} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) b_2 = K_{x_2 y}, \\ db_1^2 - (1-d)b_2^2 = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где символ D обозначает дисперсию, а символ K – ковариацию.

Из первых двух уравнений системы (10), образующих систему линейных алгебраических уравнений, выразим неизвестные b_1 и b_2 :

$$b_1 = \frac{K_{x_1 y} \left(D_{x_2} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) - K_{x_1 x_2} K_{x_2 y}}{\left(D_{x_1} + \frac{Md^2}{n} \right) \left(D_{x_2} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) - K_{x_1 x_2}^2}, \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{\left(D_{x_1} + \frac{Md^2}{n} \right) K_{x_2 y} - K_{x_1 y} K_{x_1 x_2}}{\left(D_{x_1} + \frac{Md^2}{n} \right) \left(D_{x_2} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) - K_{x_1 x_2}^2}. \quad (12)$$

Подставив полученные равенства в третье уравнение системы (10), получим многочлен $P(d)$ пятой степени, зависящий от параметра M :

$$\begin{aligned}
 P(d) = d \left(\frac{K_{x_1y} \left(D_{x_2} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) - K_{x_1x_2} K_{x_2y}}{\left(D_{x_1} + \frac{Md^2}{n} \right) \left(D_{x_2} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) - K_{x_1x_2}^2} \right)^2 - \\
 - (1-d) \left(\frac{\left(D_{x_1} + \frac{Md^2}{n} \right) K_{x_2y} - K_{x_1y} K_{x_1x_2}}{\left(D_{x_1} + \frac{Md^2}{n} \right) \left(D_{x_2} + \frac{M(1-d)^2}{n} \right) - K_{x_1x_2}^2} \right)^2 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Если устремить число M к бесконечности, то из равенства (13) получим предельное уравнение $\lim_{M \rightarrow \infty} P(d) = 0$, решение которого позволит определить критические точки, в которых могут быть экстремумы. Легко показать, что это равенство при $M \rightarrow \infty$ справедливо для любого d , т. е. экстремум может быть в любой точке. Проверка достаточного условия существования экстремума в нашем случае является весьма трудоемкой задачей, поэтому поступим следующим образом. Выразим из системы (8) переменную b_0 и подставим её в выражение (5), переписав его в виде:

$$\begin{aligned}
 S(b_1, b_2, d) = n \left(D_y + b_1^2 D_{x_1} + b_2^2 D_{x_2} - 2b_1 K_{x_1y} - 2b_2 K_{x_2y} + 2b_1 b_2 K_{x_1x_2} \right) + \\
 + M \left(d^2 b_1^2 + (1-d)^2 b_2^2 \right) \rightarrow \min.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Подставив в выражение (14) переменные b_1 и b_2 из равенств (11) и (12), получим функцию одной переменной $S(d)$, имеющую те же экстремумы, что и функция (5). Аналитическое выражение для функции $S(d)$ не приводится в силу его громоздкости. Если $d = 0$, то, используя равенства (11) и (12), найдем в этой точке пределы:

$$\begin{aligned}
 \lim_{M \rightarrow \infty} b_1 &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{K_{x_1y} \left(D_{x_2} + \frac{M}{n} \right) - K_{x_1x_2} K_{x_2y}}{D_{x_1} \left(D_{x_2} + \frac{M}{n} \right) - K_{x_1x_2}^2} = \frac{K_{x_1y}}{D_{x_1}}, \\
 \lim_{M \rightarrow \infty} b_2 &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{D_{x_1} K_{x_2y} - K_{x_1y} K_{x_1x_2}}{D_{x_1} \left(D_{x_2} + \frac{M}{n} \right) - K_{x_1x_2}^2} = 0.
 \end{aligned}$$

Аналогично, если $d = 1$, то $\lim_{M \rightarrow \infty} b_1 = 0$, $\lim_{M \rightarrow \infty} b_2 = \frac{K_{x_2y}}{D_{x_2}}$. А если $d \neq 0$ и $d \neq 1$, то $\lim_{M \rightarrow \infty} b_1 = 0$ и $\lim_{M \rightarrow \infty} b_2 = 0$. Используя найденные пределы, получим предел функции $S(d)$ в общем виде:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} S(d) = \begin{cases} nD_y, & \text{при } d \neq 0, d \neq 1, \\ n \left(D_y - \frac{K_{x_1 y}^2}{D_{x_1}} \right), & \text{при } d = 0, \\ n \left(D_y - \frac{K_{x_2 y}^2}{D_{x_2}} \right), & \text{при } d = 1. \end{cases}$$

В результате при $M \rightarrow \infty$ функция (5) имеет два локальных минимума: если $d = 0$, то имеем регрессию $y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \varepsilon_i$, а если $d = 1$, то $y_i = b_0 + b_2 x_{2i} + \varepsilon_i$. В остальных точках значение функции постоянно и равно nD_y , что соответствует регрессии с константой $y_i = b_0 + \varepsilon_i$.

Следует отметить, что решение предельного уравнения $\lim_{M \rightarrow \infty} P(d) = 0$ при $d \neq 0$ и при $d \neq 1$ дает еще одну критическую точку:

$$d = \frac{\sqrt[3]{K_{x_1 y}^2}}{\sqrt[3]{K_{x_1 y}^2} + \sqrt[3]{K_{x_2 y}^2}}, \quad (15)$$

в которой при $M \rightarrow \infty$ экстремума нет.

Работая с модифицированной функцией (5) на практике, мы не можем присвоить числу M бесконечное значение, а можем ограничиться лишь очень большим положительным числом. Тогда, решая уравнение $P(d) = 0$, получим приближенные значения экстремумов функции (5): в точке $d \approx 0$ – локальный минимум, соответствующий регрессии $y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \varepsilon_i$; в точке $d \approx 1$ – локальный минимум, соответствующий регрессии $y_i = b_0 + b_2 x_{2i} + \varepsilon_i$; в точке (15) – локальный максимум.

Таким образом, задача поиска глобального минимума функции (5) равносильна поставленной задаче выбора спецификации модели парной регрессии.

3. Моделирование расходов на непродовольственные товары в зависимости от доходов потребителя

В 1857 г. немецкий статистик Э. Энгель на основе исследования семейных расходов сформулировал закономерность – с ростом дохода доля доходов, расходуемых на продовольствие, уменьшается. Соответственно с увеличением дохода доля расходов на непродовольственные товары будет возрастать. Однако этот рост не беспределен, потому что сумма долей на все товары не может быть больше единицы, или 100 %, а на отдельные непродовольственные товары данный предел может соответствовать величине параметра a для уравнения вида

$$\hat{y} = a + \frac{b}{x}, \quad (16)$$

где \hat{y} – доля расходов на непродовольственные товары; x – доходы потребителя.

Правомерность использования равносторонней гиперболы (16) для кривой Энгеля довольно легко доказать [5]. Соответственно можно определить границу величины до-

хода, дальнейшее увеличение которого не приводит к росту доли расходов на отдельные непродовольственные товары.

Вместе с тем уравнение (16) не является единственно возможной функцией для описания кривой Энгеля. В 1943 г. Уоркинг и в 1964 г. С. Лизер для этих целей применили полулогарифмическую кривую

$$\hat{y} = a + b \ln x. \quad (17)$$

В таблице 1 представлены данные С. Лизера о доле расходов на товары длительного пользования в общих расходах семьи (y , %) и среднемесечном доходе семьи (x , тыс. долларов). Требуется определить, какая из моделей (16) или (17) лучше по величине суммы квадратов остатков.

Таблица 1

Данные о доле расходов и среднемесечном доходе семьи

x	1	2	3	4	5	6
y	10	13,4	15,4	16,5	18,6	19,1

Сначала поставленная задача была решена методом перебора с помощью эконометрического пакета Gretl. Оцененная по МНК регрессия (16) имеет вид:

$$\hat{y} = 19,753 - \frac{10,415}{x}.$$

Сумма квадратов остатков этой модели $RSS_1 = 4,986$.

Оцененная по МНК модель (17):

$$\hat{y} = 9,876 + 5,129 \ln x.$$

Сумма квадратов остатков этой модели $RSS_2 = 0,486$.

Таким образом, $RSS_1 > RSS_2$, следовательно, полулогарифмическая кривая $\hat{y} = a + b \ln x$ лучше подходит для описания кривой Энгеля.

Отметим, что решение поставленной задачи глобальной оптимизации (5) не является целью настоящей статьи. Но для демонстрации работы модифицированного МНК с помощью табличного процессора Excel построены графики зависимости суммы квадратов остатков от переменной d при $M = 100$ и при $M = 1000000$, представленные на рис. 1.

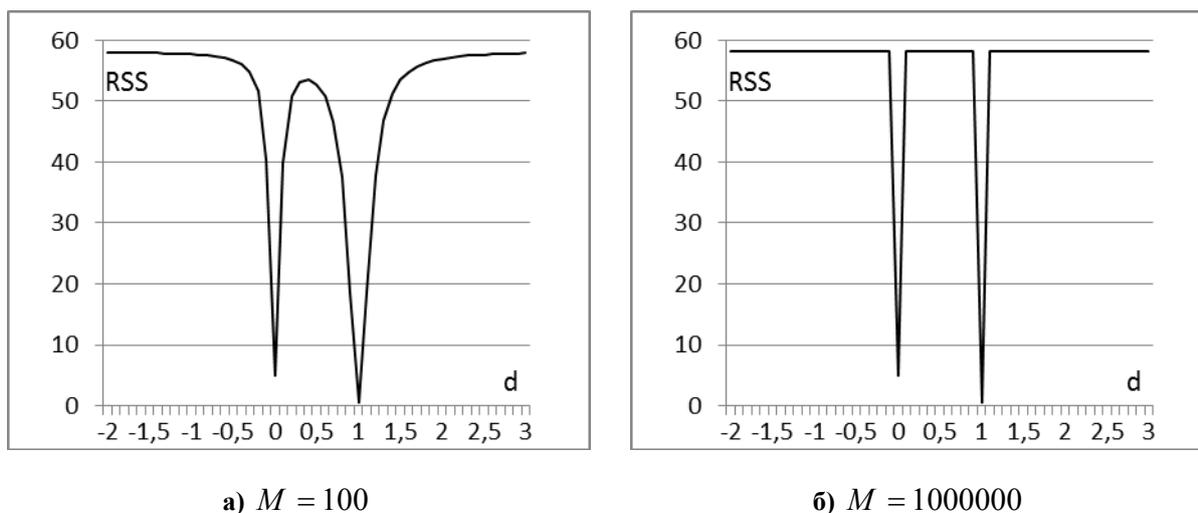


Рис. 1. Графики зависимости суммы квадратов остатков от переменной d

Как видно по рис. 1 (а), функция имеет два локальных минимума в точке 0 и 1. Очевидно, что глобальный минимум достигается в точке $d \approx 1$, соответствующей модели (17). Кроме того, функция имеет локальный максимум в точке $d \approx 0,371$, вычисленной по формуле (15). Рис. 1 (б) демонстрирует, что с ростом числа M график функции превращается в прямую линию с двумя скачками в точках экстремума.

Выводы

Подводя итог, отметим, что задача выбора спецификации модели парной регрессии сведена к задаче поиска глобального минимума функции (5). Приходится также констатировать, что в настоящее время не разработано универсального способа нахождения глобального экстремума, однако существует большое количество численных методов для решения этой проблемы. Понятно, что рассмотренная в данной статье задача выбора одной из двух регрессий гораздо эффективнее решается методом перебора. Но возможно, что для случая многих переменных переборные процедуры будут уступать по скорости решения предложенной задаче.

Библиографический список

1. *Базилевский М.П., Носков С.И.* Алгоритм формирования множества регрессионных моделей с помощью преобразования зависимой переменной // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* – 2011. – № 3. – С. 159–160.
2. *Базилевский М.П., Носков С.И.* Алгоритм построения линейно-мультипликативной регрессии // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2011. – № 1. – С. 88–92.
3. *Базилевский М.П., Носков С.И.* Методические и инструментальные средства построения некоторых типов регрессионных моделей // *Системы. Методы. Технологии.* – 2012. – № 1. – С. 80–87.
4. *Айвазян С.А.* Основы эконометрики / С.А. Айвазян. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 432 с.
5. *Эконометрика : учебник / И.И. Елисеева, С.В. Курышева, Т.В. Костеева и др.; под ред. И.И. Елисеевой.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 2007. – 576 с.



УДК 535.3 +548 +535.3+535.14+535.37+539.2+539.21:539.12.04+548.4

Б.И. Кидяров^{^1}

СТРУКТУРНО-ФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМАТИЗАЦИЯ АЦЕНТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ БОРАТОВ

Аннотация. Проведена систематизация данных по взаимосвязи «состав – структура – свойство» для 220 ацентричных боратных кристаллов. Выявлено закономерное расположение фаз с различной симметрией и величиной нелинейно-оптической восприимчивости на плоскости длин оксидных связей. Построена нечеткая экстремальная зависимость этой величины от длины кратчайших связей.

Ключевые слова: оксидные и боратные кристаллы, длины оксидных связей, структура, нелинейно-оптическая восприимчивость.

Об авторе:

^{^1} Д. ф.-м. н., старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия, kidyarov@isp.nsc.ru

B.I. Kidyarov

STRUCTURAL AND PHYSICAL SYSTEMATIZATION OF THE ACENTRIC BORATE CRYSTALS

Abstract. *Structure and nonlinear optical susceptibility ($\chi(2)$) are tabulated for ~ 220 acentric borate crystals. In the plane of the oxide bond lengths these crystals are positioned inside of the three intersected ellipses of «acentricity». The dependency of $\chi(2)$ on the shortest oxide bond lengths is fuzzy and strong non-monotonic.*

Keywords: *systematization, non-centrosymmetric crystals, structure, borate, non-linear optical susceptibility, oxide bond lengths, ellipses of «acentricity»*

Введение

Высокая оптическая прозрачность, лазерная стойкость и умеренная нелинейно-оптическая восприимчивость (НЛО, $\chi^{(2)}$) нецентросимметричных (НЦС) боратных кристаллов предопределили их широкое использование в оптоэлектронике как преобразователей инфракрасного, видимого и ультрафиолетового (УФ) излучения в более короткую область спектра, и соответственно при создании твердотельных УФ лазеров, в том числе миниатюрных твердотельных лазеров с накачкой светодиодами [1–4]. Несмотря на умеренную величину $\chi^{(2)}$, коэффициент преобразования лазерного излучения в УФ область спектра в кристаллах боратов и фосфатов весьма высок для импульсов мощного пико- и фемтосекундного диапазона. Поэтому крупные кристаллы KN_2PO_4 , LiB_3O_5 и $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ являются наиболее подходящими для использования в экспериментах по лазерному термоядерному синтезу [5].

Большая трудоемкость создания новых материалов для различных применений в технике требует априорного предвидения их физических свойств и структуры [1–2]. При этом для выполнения заданной функции в прикладных устройствах материал должен обладать не одним рекордным свойством, а совокупностью необходимых свойств [1]. Поэтому список потенциальных перспективных твердотельных материалов обязательно должен содержать расширенный набор разнообразных кристаллов [6–8]. Ранее нами показано, что систематизация материалов на основе сопоставления взаимосвязи «состав-структура-свойство» НЦС кристаллов многих оксидных соединений позволяет провести их таксономию на характерные группы по составу и структурам, обладающих различной длиной оксидной связи и величиной $\chi^{(2)}$ [9–16]. В данной работе проведен более детальный анализ 220 НЦС кристаллов боратов по их структуре и величине НЛО свойств. В этот список входят кристаллы всех 20 пьезоэлектрических структур, а в ряде кристаллов анионная группа включает второй оксид с химической π -связью.

1. Результаты и обсуждение

В кристаллической решетке каждый катион имеет один или несколько координационных полиэдров, включающих 4–12 анионов кислорода [17]. Соответственно длины оксидных связей могут быть различными даже для одного элемента. Однако в кристаллохимическом анализе удобно использовать наиболее сильную, кратчайшую оксидную связь с определенной минимальной длиной L [7, 9]. В таблице 1 представлены для

примера структурно-физические данные по 47 кристаллам боратов, которые имеют оцененную НЛЮ восприимчивость $\chi^{(2)} \geq 1,4$ пм/В, и 6 редких структур [18–61]. В качестве ключевых параметров взяты длины связей (L) в кристаллах боратов типа $M_nM_mV_pO_t$, $M_nE_mV_pO_t$, или $E_nE_mV_pO_t$, в которых катионы типа E и M подчиняются соотношению $118 \text{ пм} < L(E-O) \leq 202 \text{ пм} < L(M-O)$. Показано, что на карте длин оксидных связей $L(E-O) - L(M-O)$ НЦС кристаллы бинарных боратов располагаются в розетке из трех эллипсов «ацентричности» I, II, а простые бораты – на длинной оси эллипса III (рис. 1–2) [9–16]. Верхний и правый эллипсы, обозначенные пунктирной линией, являются вспомогательными. Известен лишь один Ti-содержащий неполярный кристалл $Va_3Ti_3O_6(VO_3)_2$, имеющий высокое значение оптической нелинейности $16 < \chi^{(2)} < 28$ пм/В (структура D_{3h}) (таблица 1) [18]. Этот борат лежит в области 2 ближе к границе эллипсов I–III, II–III (рис. 2, таблица 1). Здесь же расположены полярные кристаллы боратов-ниобатов (танталатов), (рис. 1), а на оси I–II эллипсов неполярный кристалл борат-бериллата стронция с относительно высоким значением $\chi^{(2)} \geq 2,5-4$ пм/В, (рис. 2, таблица 1). Два простых бората находятся вблизи точки пересечения I и II эллипсов ($\gamma - LiVO_2$, D_{2d} , $\chi^{(2)} \sim 6,3$, рис. 1, $Li_2B_4O_7$, C_{4v} , $\chi^{(2)} \sim 3$ пм/В, рис. 1–2, а другие с заметной нелинейностью $\chi^{(2)} \sim 2,3-3,8$ пм/В находятся в эллипсе III: $\beta-VaB_2O_4$ (C_{3v}), SrB_4O_7 (C_{2v}), PbB_4O_7 (C_{2v}), BiB_3O_6 (C_2), PbB_2O_7 (C_{2v}) (область 7 в виде криволинейного ромба, таблица 1, рис. 1). В итоге, основная часть боратов с $\chi^{(2)} > 1,8$ пм/В является полярными кристаллами, расположена внутри областей 2, 7 и имеет химическую формулу $M_nV_pO_t$, $M_nE_mV_pO_t$. В областях 1 и 3 расположены кристаллы с $\chi^{(2)} < 1,75(1,54)$ пм/В, в том числе более прозрачные в УФ области спектра. Области 4–6 пустые либо содержат кристаллы бинарных боратов цезия с низкой НЛЮ восприимчивостью. Другие ацентричные свойства боратных кристаллов в настоящее время изучены недостаточно.

На рис. 3 представлена экстремальная зависимость $\chi^{(2)} = F(L(E-O))$ для кристаллов полярных бинарных оксидов в классе от нитратов до цинкатов. Первый пологий максимум относится к полярным кристаллам боратов: $Li_2B_4O_7$, BiB_3O_6 , PbB_4O_7 (C_{4v}), $\beta-VaB_2O_4$ (C_{3v}), таблица 1). Здесь символ \times обозначает неполярный кристалл $LiVO_2$ (D_{2d}). Второй максимум образует кристалл $PbVO_3$ (C_{4v}), третий максимум соответствует кристаллу $LiNbO_3$, C_{3v} , четвертый – кристаллу ($PbTiO_3$, C_{4v}).

В интервале первого максимума располагаются кристаллы с оксидной (E-O) связью π -типа (нитриты, нитраты, бораты, сульфаты, фосфаты, силикаты). В интервале длин $L(E-O) = 163-202$ пм располагаются кристаллы второго – четвертого максимумов с оксидной связью σ -типа (ванадиты, германаты, молибдаты, вольфраматы, иодаты, титанаты, танталаты, цинкаты). Однако, бораты σ -типа с высокой величиной $\chi^{(2)}$ имеют пониженную лучевую стойкость и менее прозрач-

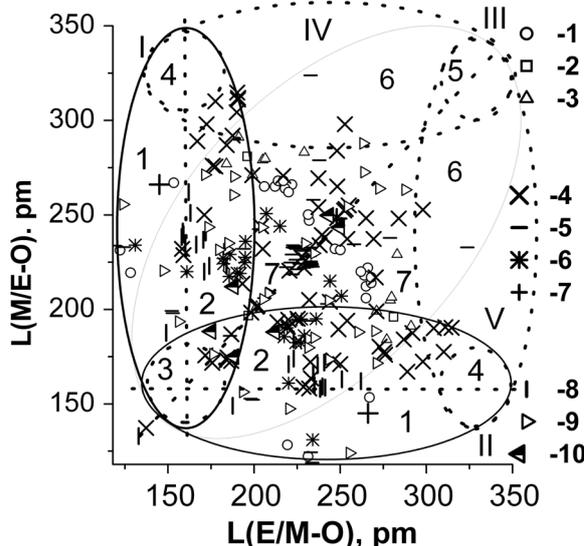


Рис. 1. Множество кратчайших длин оксидных связей для полярных «ацентричных» простых и бинарных боратных кристаллов.
 1 – C_{6v} ; 2 – C_{4v} ; 3 – C_{3v} ; 4 – C_{2v} ; 5 – C_s ; 6 – C_6 ;
 7 – C_4 ; 8 – C_3 ; 9 – C_2 ; 10 – C_1

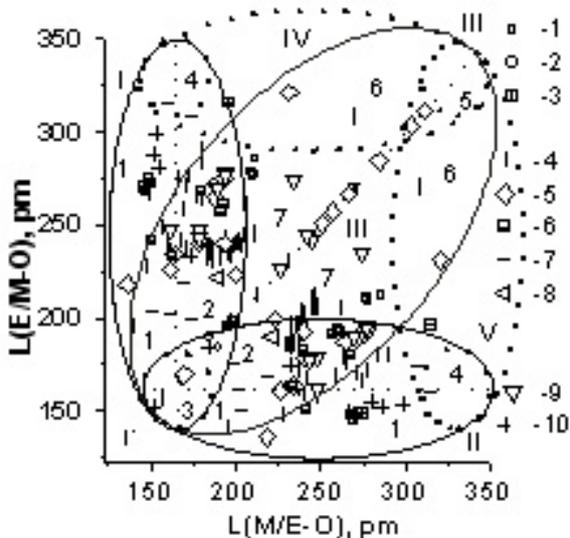


Рис. 2. Множество кратчайших длин оксидных связей для неполярных «ацентричных» простых и бинарных боратных кристаллов.
 1 – T; 2 – D₆; 3 – D₄; 4 – D₃; 5 – D₂; 6 – D_{2d}; 7 – S₄;
 8 – C_{3h}; 9 – D_{3h}; 10 – T_d

$\chi^{(2)} \sim 28$ пм/В), и γ – LiBO₂ (D_{2d}, $\chi^{(2)} \sim 6,3$ пм/В, рис. 3), в то время как на рис. 4 эти максимумы соответствуют кристаллам Ва₃Тi₃О₆(ВО₃)₂, Pb_{0.7}Ва_{0.3}В₄О₇ (C_{2v}, $\chi^{(2)} \sim 5,1$ пм/В) и β -RbВ₃О₅ (D₂, $\chi^{(2)} \sim 1,5$). Таким образом, несмотря на нечеткий характер всех зависи-

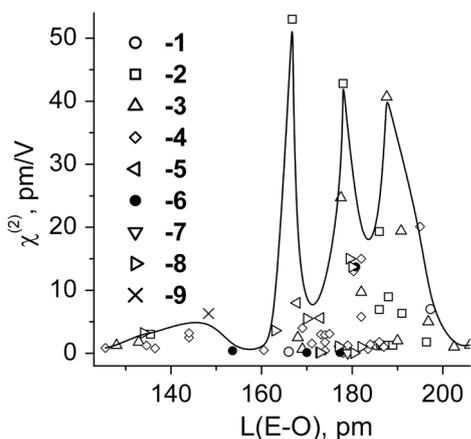


Рис. 3. Зависимость максимальной величины $\chi^{(2)}$ от длины L(E-O) для кристаллов бинарных оксидов в классе нитратов, боратов, фосфатов, сульфатов, силикатов (L(E-O) = 125–163 pm), и для хроматов, ванадатов, германатов, молибдатов, вольфрамов, иодатов, титанатов, танталатов, цинкатов (L = 163–202 pm).
 1 – C_{6v}; 2 – C_{4v}; 3 – C_{3v}; 4 – C_{2v}; 5 – C_s; 6 – C₆,
 7 – C₃; 8 – C₂; 9 – D_{2d}

ны в УФ области спектра, чем кристаллы боратов π -типа [1]. Эти кристаллы, не содержащие переходных элементов (Cr, Ge, V, Mo, W, I, Nb, Ti, Ta, Zr), имеют более высокую лучевую стойкость [1–2]. Экстремальные зависимости $\chi^{(2)} = F(L(B-O))$ и $\chi^{(2)} = F(L(E-O))$ построены по данным таблицы 1 также и для кристаллов боратов (рис. 3–4). На рис. 3 наблюдается большой разброс величины L(B-O), 129–152 пм, среди представленной совокупности боратов. Это обусловлено наличием нескольких анионных групп кристаллов боратов: плоской тригональной (ВО₃)³⁻, тетрагональной (ВО₄)⁵⁻, дитригональной (В₂О₅)⁴⁻, дитетрагональной (В₂О₇)⁸⁻, плоской кольцевой (В₃О₆)³⁻, НЛО восприимчивость которых различна [1–2, 62–63]. Два выявленных четких максимума $\chi^{(2)}$ относятся к неполярным кристаллам Ва₃Тi₃О₆(ВО₃)₂ (структура D_{3h},

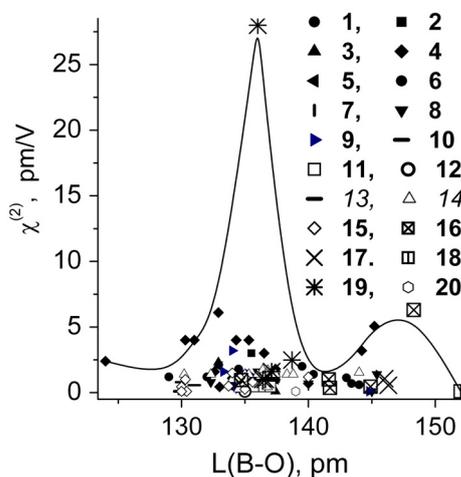


Рис. 4. Зависимость максимальной величины $\chi^{(2)}$ от кратчайшей длины L(B-O) для кристаллов простых и бинарных боратов.
 Темные символы – структуры полярных кристаллов: 1 – C_{6v}; 2 – C_{4v}; 3 – C_{3v}; 4 – C_{2v}; 5 – C_s; 6 – C₆; 7 – C₄; 8 – C₃; 9 – C₂; 10 – C₁;
 Символы 11–20 – неполярные кристаллы: 11 – T; 12 – D₆; 13 – D₄; 14 – D₃; 15 – D₂; 16 – D_{2d};
 17 – S₄; 18 – C_{3h}; 19 – D_{3h}; 20 – T_d

мостей $\chi^{(2)} = F(L(B-O))$ и $\chi^{(2)} = F(L(E-O))$, совокупное нечеткое множество данных ограничено сверху довольно четкой экстремальной линией, отражающей разделение оксидов и боратов на два типа по π - и σ -связям химических элементов с кислородом.

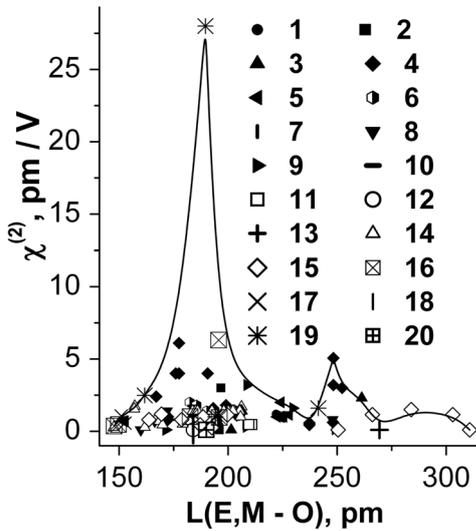


Рис. 5. Зависимость максимальной величины $\chi^{(2)}$ от кратчайшей длины $L(E-O)$ для кристаллов простых и бинарных боратов.

Темные символы – структуры полярных кристаллов: 1 – C_{6v} ; 2 – C_{4v} ; 3 – C_{3v} ; 4 – C_{2v} ; 5 – C_s ; 6 – C_6 ; 7 – C_4 ; 8 – C_3 ; 9 – C_2 ; 10 – C_1 ;
Символы 11–20 – неполярные кристаллы: 11 – T_d ; 12 – D_6 ; 13 – D_4 ; 14 – D_3 ; 15 – D_2 ; 16 – D_{2d} ; 17 – S_4 ; 18 – C_{3h} ; 19 – D_{3h} ; 20 – T_d

кристаллы перспективны для использования в нелинейной оптике УФ диапазона [1–2, 3, 7–8].

Кроме того, видно, что число кристаллов, обладающих повышенными НЛО свойствами, невелико, в то время как основная часть НЦС кристаллов образует более компактное множество с умеренными величинами $\chi^{(2)}$. Отметим, что в систематизации природных минералов в качестве ключевого информативного параметра также учитывается длина оксидной связи [64]. По этому признаку в одну группу объединяются минералы нитратов, карбонатов и боратов [64–67]. В группу карбонатов необходимо включать также кристаллы тартратов, формиатов, ацетатов, содержащие монооксид углерода (CO , $COOH$) [68]. В частности, НЛО восприимчивость кристаллов тартратов сравнима с величиной $\chi^{(2)}$ боратов [69]. В последние годы расширяется число работ по синтезу новых НЦС кристаллов, содержащих два аниона: гидроксил-карбонатов, фтор-карбонатов, нитрат-карбонатов, фтор-боратов, карбонат-боратов [30, 39, 61, 70–73]. Такие

Таблица 1

Состав, структурные и нелинейно-оптические свойства ($\chi^{(2)}$) кристаллов боратов

№	Химический состав	Симметрия	L, нм M-O	L, нм E-O	L, нм B-O	$\chi^{(2)}$ рм/В	Ссылка
1	$Ba_3Ti_3O_6(BO_3)_2$	D_{3h}	269,3	189,6	136,0	~28	18
2	$\gamma - LiBO_2$	D_{2d}	195,7	195,7	148,3	6,3	19
3	$KNbB_2O_6$	C_{2v}	275,6	177,5	132,9	6,1	20
4	$Pb_{0,7}Ba_{0,3}B_4O_7$	C_{2v}	265	248,3	144,2	5,1	21
5	$CsNbOB_2O_5$	C_{2v}	310,1	177,5	135,3	~4	22
6	$TiNbB_2O_6$	C_{2v}	276	176	130	~4	23
7	$CsTaOB_2O_5$	C_{2v}	311	190,6	131	~4	24
8	$Pb_4B_4O_7$	C_{2v}	220,5	220,5	133,5	3,8	25
9	BiB_3O_6	C_2	208,7	208,7	134	3,2	26
10	$Pb_4B_4O_7$	C_{2v}	248,3	248,3	144,2	3,2	26
11	SrB_4O_7	C_{2v}	252,3	252,3	136,5	3	2, 27
12	$Li_2B_4O_7$	C_{4v}	196,7	196,7	135,5	3	2, 28
13	$Sr_2Be_2B_2O_7$	D_{3h}	247,8	161,8	138,7	2,48	3
14	$RbNbB_2O_6$	C_{2v}	289	167	124	2,4	29
15	$Pb_2(BO_3)(NO_3)$	C_{6v}	231,3	122,2	139,2	2,4	30

№	Химический состав	Симметрия	L, пм M-O	L, пм E-O	L, пм B-O	$\chi^{(2)}$ рм/В	Ссылка
16	β -BaB ₂ O ₄	C _{3v}	261,3	261,3	132,9	2,3	31
17	Cd ₄ BiO(BO ₃) ₃	C _s	226,3	224,2	133	2	32
18	Sm ₃ BWO ₉	C ₆	224,2	182,4	139,5	2	33
19	LuCd ₄ O(BO ₃) ₃	C _s	216,2	223,2	133,3	1,84	34
20	YCd ₄ O(BO ₃) ₃	C _s	224,8	221,2	135,3	1,82	34
21	Dy ₃ BWO ₉	C ₆	217,4	185,5	134,5	1,8	33
22	BaBiBO ₄	C _{2v}	271	199	137,4	1,8	35
23	KTaB ₂ O ₆	C _{2v}	286,9	184,1	134,7	1,79	36
24	GdCd ₄ O(BO ₃) ₃	C _s	218,6	222,3	133,2	1,79	34
25	Lu _{0,66} La _{0,95} Sc _{2,39} (BO ₃) ₄	D ₃	247,8	157,2	136,4	1,74	37
26	Cs ₂ B ₄ SiO ₉	S ₄	315	~161	139,65	1,72	38
27	CeSc ₃ (BO ₃) ₄	D ₃	245,1	206,1	136,8	1,7	37
28	PbO(OH) ₅ (BO ₃)CO ₃	C _{6v}	219,4	128,3	139,2	1,7	39
29	BiAlGa ₂ (BO ₃) ₄	D ₃	238,0	190,8	135	1,6	40
30	La ₂ CaB ₁₀ O ₁₉	C ₂	234,9	229,7	133,3	1,6	41
31	Bi ₂ ZnB ₂ O ₇	C _{2v}	213,6	193,2	132,6	1,6	42
32	Eu ₃ BWO ₉	C ₃	223	184	136	1,6	33
33	Na ₃ La ₉ O ₃ (BO ₃) ₈	D _{3h}	245,0	241,4	137,1	1,6	43
34	BiAsO ₄	D ₃	157	157	144	1,54	44
35	β -RbB ₃ O ₅	D ₂	284	284	134	1,5	45
36	Y _{0,57} La _{0,72} Sc _{2,71} (BO ₃) ₄	D ₃	244,8	205,8	135,3	1,4	46
37	YAl ₃ (BO ₃) ₄	D ₃	232,1	183,7	138,3	1,4	47
39	NdAl ₃ (BO ₃) ₄	D ₃	237,1	185,8	135	1,4	48
40	GdAl ₃ (BO ₃) ₄	C ₂	231,8	184,3	135,3	1,4	49
41	YbAl ₃ (BO ₃) ₄	D ₃	229,5	185,9	136,9	1,4	50
42	TmAl ₃ (BO ₃) ₄	D ₃	230,5	186,0	137,4	1,4	51
43	NdGa ₃ (BO ₃) ₄	D ₃	237,9	192,6	138,8	1,4	52
44	PrSc ₃ (BO ₃) ₄	C ₂	243,4	204,7	134	1,4	37
45	β -LaSc ₃ (BO ₃) ₄	D ₃	248,3	205,7	134,2	1,4	53
46	Gd _{0,97} Eu _{0,03} Al ₃ B ₄ O ₁₂	D ₃	234,1	185,1	136	1,4	54
47	LaBGeO ₅	C ₃	240,7	171,9	145,4	1,4	55
48	Zn ₄ O(BO ₂) ₆	T _d	184	184	152	>0,1	56
49	TiBO ₂	C ₄	248	248	140	>0,1	57
50	LiCdBO ₃	C _{3h}	190	221,3	139	>0	58
51	Rb ₅ S ₄ BO ₁₆	D ₄	269,7	145,9	131,3	>0	59
52	Li _{2,46} Al _{0,18} BO ₃	D ₆	189,8	184	135	>0,	60
53	Ca ₄ Mn ₃ O ₃ (BO ₃) ₃ (CO ₃)	C ₆	234	131	127	>0,	61

2. Заключение

Итак, подбор состава кристаллов позволяет проводить поиск новых НЦС фаз кристаллов боратов, включая двуханионные сложные оксиды с химическими π -связями. При этом учет длины химических связей в оксидных кристаллах, а также типа этих связей является важным информативным параметром в дизайне новых НЦС кристаллов и материалов для оптоэлектроники. По этому параметру состав оксидных кристаллов следует разграничивать по трем группам: 1) L(E-O) \approx 124–163 пм (оксидные π -связи), 2) L(E-O) \approx 163–202 пм (оксидные σ -связи), 3) оксидные связи с L(M-O) > 202 пм. Кристаллы 3 группы являются центросимметричными. Кристаллы, включающие 1, 2 или совокупность 1+2, 1+3, 2+2, 2+3, 1+2+2, 1+2+3 выделенных групп, потенциально могут быть нецентросимметричными. Среди кристаллов монооксидов (1 группа) и в бинар-

ных оксидах группы 1+2 только в кристаллах ZnO и NiO₃ величина $\chi^{(2)} = 7$ и 7,3 пм/В соответственно. Высокие НЛО свойства ($\chi^{(2)} > 7,5$ пм/В) наблюдаются только среди НЦС кристаллов бинарных 2+2, 2+3 и тройных оксидов 1+2+2, 1+2+3 групп [8–16].

Экспериментальное сопоставление величины нелинейно-оптических и других ацентричных свойства кристаллов проведено нами в работе [74]. Показано, что некоторый максимум НЛО свойств наблюдается при средних величинах электрооптического коэффициента, а наиболее четкий максимум $\chi^{(2)}$ соответствует достаточно высоким значениям пьезосвойств. Поэтому систематизация и знание полного списка НЦС кристаллов позволяют установить генетические связи величины ацентричных свойств этих кристаллов с их составом и частично прогнозировать поиск новых перспективных материалов для оптоэлектроники среди различных классов неорганических веществ [1, 7–16].

Библиографический список

1. Рез И.С. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике / И.С. Рез, Ю.М. Поплаво. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
2. Chen C.-T. The development of new NLO crystals in the borate series / C.-T. Chen, Y. Wu, R. Li, // J. Cryst. Growth. – 1990. – V. 99. – P. 790–798.
3. Chen C.-T. Design and synthesis of an ultraviolet-transparent nonlinear optical crystal Sr₂Be₂B₂O₇ / C.-T. Chen, Y.-B. Wang, B.-C. Wu, K.-C. Wu, W.-I. Zeng, L.-H. Yu // Nature (London). – 1995. – V. 373. – P. 32–324.
4. Sasaki T. Recent development of non-linear optical borate crystals: key materials for generation of visible and UV-light / T. Sasaki, Y. Mori, M. Yoshimira, Y.K. Yap, T. Kamimura // Materials Science and Engineering. – 2000. – V. R30, № 1–2. – P. 1–54.
5. Бредихин В.И. Кристаллы типа KDP для мощных лазерных систем: проблемы скоростного роста и оптические свойства: Дис. ... докт. физ.-мат. Наук / Институт прикладной физики РАН. – Нижний Новгород, 2011. – 274 с.
6. Halasyamani P. Sh. Noncentrosymmetric Oxides / P. Sh. Halasyamani, K.R. Poeppelmeer // Chem. Mater. – 1998. – V. 10. – P. 2753–2769.
7. Атучин В.В. Феноменологический дизайн новых ацентричных боратных кристаллов для оптоэлектроники / В.В. Атучин, Б.И. Кидяров, Н.В. Первухина // Сборник трудов IX Международной школы-семинара по «Люминесценции и лазерной физике». 13–17 сентября 2004 г. Иркутск, Россия. Ред. акад. С.Н. Багаев, акад. Н.А. Борисевич, проф. Е.Ф. Мартынович. – Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 2005. – С. 63–75.
8. Nikogosyan D.N. Nonlinear optical crystals: A complete survey / D.N. Nikogosyan. – N.Y.: Springer, 2005. – 427 p.
9. Atuchin V.V. Phenomenological modeling and design of new acentric crystals for optoelectronics / V.V. Atuchin, B.I. Kidyarov, N.V. Pervukhina // Comput. Mater. Sci. – 2004. – V. 30, 3–4. – P. 411–418.
10. Atuchin V.V. Shortest chemical bond length as a criterion for searching new noncentrosymmetric phosphate crystals / V.V. Atuchin, B.I. Kidyarov, N.V. Pervukhina // Ceramics Int. – 2004. – V. 30, № 7. – P. 2005–2009.
11. Kidyarov B.I. Interrelationship of micro- and macrostructure with nonlinear-optical properties of iodate and titanate crystals / B.I. Kidyarov, V.V. Atuchin N.V. Pervukhina // Physics of the Solid State. – 2009. – Vol. 51, № 8. – P. 1548–1552.
12. Kidyarov B.I. Interrelationship of micro- and macrostructure with nonlinear optical properties of simple and binary acentric niobate crystals / B.I. Kidyarov, V.V. Atuchin // Ferroelectrics. – 2010. – V. 363. – P. 159–168.
13. Kidyarov B.I. Interrelationship “composition-structure-nonlinear properties” in aluminate crystals / B.I. Kidyarov, V.V. Atuchin // Ferroelectrics. – 2010. – V. 397, № 1. – P. 151–158.
14. Kidyarov B.I. Systematization of simple and binary silicates according to relationship “composition – structure – property” / B.I. Kidyarov, V.V. Atuchin // Ferroelectrics. – 2010. – V. 397, № 1. – P. 169–176.
15. Kidyarov B.I. Interrelationship “Structure- Property” for the Crystals of Noncentrosymmetric Tungstates / B.I. Kidyarov, V.V. Atuchin // Ferroelectrics. – 2013. – V. 444, № 1. – P. 144–149.
16. Kidyarov B.I. Interrelationship of micro- and macrostructure with physical properties of germinates / B.I. Kidyarov, V.V. Atuchin, I.B. Troitskaia // Ferroelectrics. – 2013. – V. 444, № 1. – P. 137–143.
17. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия / В.С. Урусов. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 275 с.

18. *Park H. J.* Noncentrosymmetric $Ba_3Ti_3O(BO_3)_2$ / H. Park., A. Bakhtiarov, W. Zhang, I. Vargas-Baca, Barbier // *J. Solid State Chem.* – 2004. – V. 177, № 1. – P. 159–164.
19. *Marezio. M.* Polymorphism of $LiMO_2$ compounds and high-pressure single-crystal synthesis of $LiBO_2$ / M. Marezio, J.P. Remeika // *J. Chem. Phys.* – 1966. – V. 44, № 9. – P. 3348–3353.
20. *Schmid S.* Structure of $KNbOB_2O_5$ – a commensurately modulated structure / S. Schmid, and T. Wagner // *Acta Cryst.* – 2005. – V. B61, № 4. – P. 361–366.
21. *Corker D.L.* Structure and optical non-linearity of $PbO \cdot 2B_2O_3$ / D.L. Corker., A.M. Glazer // *Acta Cryst.* – 1996. – B52. – P. 260–265.
22. *Becker P.* $CsNbOB_2O_5$: the basic structure type of the borates $AMOB_2O_5$ (A=K, Rb, Cs, Tl; M=Nb, Ta) / P. Becker, L. Bohatý, R. Fröhlich, // *Acta Cryst.* – 1995. – V. C51, № 9. – P. 1721–1723.
23. *Gasperin. P.M.* Synthèse et Structure d'un Oxyde Multiple d'un Type Nouveau: $TlNbB_2O_6$ / P.M. Gasperin. // *Acta Cryst.* – 1974. – V. B30, № 5. – P. 1181–1183.
24. *Akella A.* Crystal Chemistry of noncentrosymmetric alkali-metal Nb and Ta oxide pyroborates / A. Akella, D.A. Keszler // *J. Solid State Chem.* – 1995. – V. 120, № 1. – P. 74–79.
25. *Yu H.* A new congruent-melting oxyborate, $Pb_4O(BO_3)_2$ with optimally aligned BO_3 triangles adopting layered-type arrangement / H.Yu, Sh. Pan., H. Wu, W. Zhao, F. Zhang, H. Li, Zh. Yang // *J. Materials Chemistry.* – 2012. – V. 22, № 5. – P. 2105–2110.
26. *Fröhlich R.* Die Kristallstruktur von Wismutborat, BiB_3O_6 / R. Fröhlich, L. Bohatý, J. Liebertz // *Acta Cryst.* – 1984. – V. C40. – P. 343–344.
27. *Perloff A.* The crystal structure of the strontium and lead tetraborates, $SrO \cdot 2B_2O_3$ and $PbO \cdot 2B_2O_3$ / A. Perloff, S. Block // *Acta Cryst.* – 1966. – V. 20, № 2. – P. 274–279.
28. *Радаев С.Ф.* Атомная структура и электронная плотность тетрабората лития $Li_2B_4O_7$ / С.Ф. Радаев, Л.А. Мурадян, Л.Ф. Малахова, Я.В. Бурак, В.И. Симонов // *Кристаллография.* – 1989. – Т. 34. № 6. – С. 1400–1407.
29. *Baucher P.A., Gasperin M., Cervelle B.* $RbNbB_2O_6$ // Structure de la maille et propriétés optiques / P.A. Baucher, M. Gasperin, B. Cervelle // *Acta Cryst.* – 1976. – V. B32, № 7. – P. 2211–2215.
30. *Song, J.L., Hu, Ch.-L., Xu, X.;* et al. A facile synthetic route to a new SHG material with two types of parallel pi-conjugated planar triangular units // *Angewandte Chemie – International Edition.* – 2015. – V. 54, № 12. – P. 3679–3682.
31. *Fröhlich R.* Crystal structure of the low-temperature form of BaB_2O_4 / R. Fröhlich // *Z. Kristallogr.* – 1984. – V. 168. – P. 109–112.
32. *Zhang W.-L.* A strong second-harmonic generation material $Cd_4BiO(BO_3)_3$ originating from 3-chromophore asymmetric structures / W.-L. Zhang., W.-D. Cheng., H. Zhang, L. Geng, Ch.-Sh. Lin, Zh.-Zh. He. // *J. Am. Chem. Soc.* – 2010. – V. 132. – P. 1508–1509.
33. *Крутько В.А.* Структуры нелинейных гексагональных боратовольфраматов Ln_3BWO_9 (Ln = La, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy) / В.А. Крутько, А.А. Белик, Г.В. Лысанова // *Ж. неорг. Химии.* – 2006. – Т. 51, № 6. – С. 954–959.
34. *Zou, G.* Cadmium-rare earth oxyborates $Cd_4ReO(BO_3)_3$ (Re=Y, Gd, Lu): congruently melting compounds with large SHG responses / Zou, G. Ma, K. Wu, et al. // *J. Materials Chemistry.* – 2012. – V. 22, № 37. – P. 19911–19918.
35. *Barbier J.* $BaBiBO_4$, a novel noncentrosymmetric borate oxide / J. Barbier, N. Penin, A. Denoyer, Lachlan M.D. Cranswick // *Solid State Sci.* – 2005. – V. 7. – P. 1055–1061.
36. *Cai G.* Phase relations of the $Li_2O-Ta_2O_5-B_2O_3$ and $Li_2O-WO_3-B_2O_3$ systems and promising nonlinear optical compounds in $K_2O-Ta_2O_5-B_2O_3$ system / G. Cai, W.Y. Wang, M. Li, Y.F. Lou, Y. Sun, X.L. Chen // *Mat. Res. Bull.* – 2009. – V. 44. – P. 189–193.
37. Кузьмичева Г.М. Разупорядоченные структуры скандоборатов редкоземельных элементов семейства хантита / Г.М. Кузьмичева, В.Б. Рыбаков, С.Г. Новиков, А.Ю. Агеев., С.А. Кутовой, О.В. Кузьмин // *Ж. неорг. Химии.* – 1999. – Т. 44. № 3. – С. 352–366.
38. *Xu X.* $Cs_2GeB_4O_9$: a new second-order nonlinear-optical Crystal / X. Xu, Ch.L. Hu., F. Kong, J.H. Zhang, J.G. Mao, J. Sun // *Inorg. Chem.* – 2013. – V. 52, № 10. – P. 5831–5837.
39. *Abudourehman M.* $Pb_7O(OH)_3(BO_3)CO_3$: First mixed borate and carbonate nonlinear optical material exhibiting large second-harmonic generation response / M. Abudourehman, L. Wang, X. Zhang, H. Yu, Zh. Yang, Ch. Lei, J. Han, Sh. Pan // *Inorganic Chemistry.* – 2015. – V. 54. – P. 4138–4142.
40. *Wang S.* Nonlinear optical crystal $BiAlGa_2(BO_3)_4$ / S. Wang, N. Ye // *Solid State Sci.* – 2007. – V. 9. – P. 713–717.
41. *Wu Y.* A new lanthanum and calcium borate $La_2CaB_{10}O_{19}$ / Y. Wu, J. Liu, P. Fu, J. Wang, H. Zhou, G. Wang, Ch. Chen // *Chem. Mat.* – 2001. – V. 13. – P. 753–755.
42. *Barbier J.* Melilite-type borates $Bi_2ZnB_2O_7$ and $CaBiGaB_2O_7$ / J. Barbier, N. Penin, A. Denoyer, Lachlan M.D. Cranswick // *Chem. Mater.* – 2005. – V. 17. – P. 3130–3136.

43. *Peshev P.* Studies on some ternary oxyborates of the $\text{Na}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ (Me = rare earth or aluminum) systems: Synthesis, structure and crystal growth / P. Peshev, S. Pechev, V. Nikolov, P. Gravegeau, J.-P. Chaminade, D. Binev, D Ivanova // *J. Solid State Chem.* – 2006. – V. 179. – P. 2834–2849.
44. *Нараи-Сабо И.* Неорганическая кристаллохимия. – Будапешт : Изд-во АН Венгрии, 1969. – 504 с.
45. *Кржижановская М.Г.* Кристаллическая структура и тепловое расширение высоко-температурной модификации $\beta\text{-RbB}_3\text{O}_5$ / М.Г. Кржижановская., Р.С. Бубнова, В.С. Фундаменский., И.И. Баннова, И.Г. Полякова., С.К. Филатов // *Кристаллография.* – 1998. – Т. 43, № 1. – С. 26–30.
46. *Рыбаков В.Б.* Рентгеноструктурное исследование соединений $(\text{Ce,Gd})\text{Sc}_3(\text{BO}_3)_4$ семейства хантита / В.Б. Рыбаков, Г.М. Кузьмичева, Б.В. Мухин, Е.В. Жариков, А.Ю. Агеев., С.А. Кutowой, О.В. Кузьмин // *Ж. неорг. химии.* – 1997. – Т. 42, № 1. – С. 9–16.
47. *Белоконова Е.Л.* Кристаллическая структура $\text{YAl}_3[\text{BO}_3]_4$ / Е.Л. Белоконова, А.В. Азизов, Н.И. Леонюк, М.А. Симонов, Н.В. Белов // *Ж. структ. химии.* – 1981. – Т. 22, № 3. – С. 196–199.
48. *Hong H.Y.-P.* Crystal structure and fluorescence lifetime of $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ a promising laser material / H.Y.-P. Hong, K. Dwight // *Mat. Res. Bull.* – 1974. – V. 9, № 12. – P. 1661–1666.
49. *Белоконова Е.Л.* Кристаллическая структура новой моноклинной модификации высокотемпературного TR-Al-бората $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ / Е.Л. Белоконова, А.В. Пашков, Т.И. Тимченко, Н.В. Белов // *ДАН СССР.* – 1981. – Т. 261, № 2. – С. 361–365.
50. *Yong-Yuan X.* Growth and crystal structure of $\text{YbAl}_3(\text{BO}_3)_4$ / X. Yong-Yuan, Ch. Yu-Jin, L. Zun-Du, Ch. Jiu-Tong, H. Yi-Dong // *Chin. J. Struct. Chem.* – 2002. – V. 21, № 4. – P. 402–404.
51. *Jia G.* Crystal structure, Judd-Ofelt analysis, and spectroscopic assessment of a $\text{TmAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystals as a new potential diode-pumped laser near $1.9 \mu\text{m}$ / G. Jia, Ch. Tu, J. Li, Zh. You, Zh. Zhu., B. Wu // *Inorg. Chem.* – 2006. – V. 45, № 23. – P. 9326–9331.
52. *Белоконова Е.Л.* Кристаллическая структура $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ / Е.Л. Белоконова, Л.И. Альшинская, М.А. Симонов, Н.И. Леонюк, Т.И.Тимченко, Н.В. Белов // *Ж. структ. химии.* – 1978. – V. 19, № 2. – С. 382–384.
53. *He M.* Structure of medium temperature phase $\beta\text{-LaSc}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal / M. He, G. Wang, Zh. Lin, W. Chen, Sh. Lu, Q. Wu // *Mat. Res. Innovat.* – 1999. – V. 2. – С. 345–348.
54. *Kuroda R.* Crystal structure and single-crystal spectra of $\text{Gd}(\text{Eu})\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ / R. Kuroda, S.F. Mason, C. Rosini // *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* – 1981. – Pt. 2, V. 77, № 11. – P. 2125–2140.
55. *Каминский А.А.* Выращивание, структура и спектроскопия кристаллов борогерманата лантана LaBGeO_5 / А.А. Каминский, Б.В. Милль, Е.Л. Белоконова, А.В. Буташии // *Неорг. матер.* – 1990. – Т. 26, № 5. – С. 1105–1107.
56. *Smith-Verdier P.* Redetermination of the structure of anhydrous zinc metaborate $\text{Zn}_4\text{O}(\text{BO}_2)_6$ / P. Smith-Verdier, S. Garcia-Blanco // *Z. Kristallog.* – 1980. – Bd.151 № ½. – S. 175–177.
57. *Touboul M.* Structure crystalline de TlBO_2 / M. Touboul, D. Amoussou, // *Rev. Chim. Miner.* – 1978. – V. 15. – P. 223–231.
58. *Соколова Е.В.* Уточненная кристаллическая структура гексагональной модификации LiCdBO_3 / Е.В. Соколова, М.А. Симонов, Н.В. Белов // *Кристаллография.* – 1980. – Т. 5, № 6. – С. 1285–1286.
59. *Xia, M. J.* Structure and optical properties of a noncentrosymmetric borate $\text{RbSr}_4(\text{BO}_3)_3$ / M. J Xia, R. K. Li // *Journal of Solid State Chemistry.* – 2013. – V. 197. – P. 366–369.
60. *He M.* The Al^{3+} stabilized phase $\text{Li}_{3-3x}\text{Al}_x\text{BO}_3$ / M. He, H. Okudera, J. Fleig, A.Simon, X.L Chen // *J. Solid State Chem.* – 2005. – V. 178. – P. 680–687.
61. *Якубович О.В.* Уточнение кристаллической структуры годфруаита, $\text{Ca}_4\text{Mn}_3\text{O}_3(\text{BO}_3)_3(\text{CO}_3)$ / О.В. Якубович, М.А., Симонов, Н.В. Белов // *Кристаллография.* – 1980. – Т. 25, № 5. – С. 944–949.
62. *Becker P.* A contribution to borate crystal chemistry: rules for the occurrence of polyborate anion types / P. Becker // *Z. Kristallograph.* – 2001. – Bd. 216. – P. 523–533.
63. *Belokoneva E.L.* Systematic, properties, and structure predictions of new borate materials / E.L. Belokoneva // *Cryst. Res. Technol.* – 2008. – V. 43, № 11. – P. 1173–1182.
64. *Strunz H.* Mineralogische tabellen / H. Strunz // Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.G. – 1957.
65. *Strunz H.* Classification of borate mineral / H. Strunz // *Eur. J. Miner.* – 1997. – V. 9. – P. 225–232.
67. Берри Л. Минералогия / Л. Берри, Б. Майсон, Р. Дитрих. – М. : Мир, 1987. – 592 с.
68. *Кидяров Б.И.* Взаимосвязь физических свойств и микроскопических параметров оксидных кристаллов – основа классификации и поиска новых материалов / Б.И. Кидяров // *Труды IV Международной конференции «Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение».* Т.2. Ред. Е.В. Полянский, А.И. Медовой. – Александров : ВНИИСМИС, 1999. – С. 3–22.
69. *Иона Ф.* Сегнетоэлектрические кристаллы / Ф. Иона, Д. Ширане. – М. : Мир, 1965. – 555 с.

70. Zou G. Alkaline – alkaline earth fluoride carbonate crystals $ABCO_3F$ ($A=R, Rb, Cs; B=Ca, Sr, Ba$) as nonlinear optical materials / G. Zou, N.Ye, L.Huang, X. Lin // J. Am. Chem. Soc. – 2011. – V. 133, № 49. – P. 20001–20007.
71. Tran T.Th. New fluoride carbonates: centrosymmetric $KPb_2(CO_3)_2F$ and noncentrosymmetric $K_{2.70}Pb_{5.15}(CO_3)_5F_3$ / T.Th. Tran, P.Sh. Halasyamani // Inorg. Chem. – 2013. – Vol. 52. – P. 2466–2473.
72. Luo M. $Na_2Lu_2(CO_3)_6F_2$ and $Na_3Lu(CO_3)_6F_2$: rare earth fluoride carbonates as deep-UV nonlinear optical materials/ M. Luo, N. Ye, Z G.ou, C.Lin, and W. Cheng // Chem. Mater. – 2013. – Vol. 25. – P. 3147–3153.
73. Luo M. Sodium rare earth carbonates with shorite structure and large second harmonic generation response / M. Luo, C. Lin, G. Zou, N. Ye, and W. Cheng // CrystEngComm. – 2014. – Vol. 16. – P. 4414–4421.
74. Кидяров Б.И. Нецентросимметричные оксидные кристаллы: взаимосвязь «пьезоэлектрических – нелинейно-оптических – электрооптических свойств» / Б.И. Кидяров // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 298–302.



УДК 629.1.05

В.С. Марюхненко¹, Н.Г. Мудрая²

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ БАЛЛАСТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ

Аннотация. В статье проанализированы электрохимическая природа, характер и диапазон изменений сопротивления балласта. Рассмотрены факторы, влияющие на сопротивление растеканию электрического тока через балласт, а также влияние электрического сопротивления балласта рельсовой цепи на безотказность и надежность аппаратуры систем интервального регулирования и автоблокировки. Предложены методы борьбы с флуктуацией электрического сопротивления изоляции рельсовой цепи.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, балласт железнодорожного пути, рельсовая цепь, интервальное регулирование движения поездов, автоматическая блокировка.

Об авторах:

¹ Д. т. н., профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, e-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

² Студент 5-го курса специальности «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, e-mail: mydrayanataliya@mail.ru

V.S. Maryuhnenko, N.G. Mydraya

PHYSICAL AND TECHNICAL ASPECTS RESISTANCE CHANGE OF RAILWAYS OF BALLAST

Abstract. The article explores the electrochemical nature, character and range of changes in the resistance of the ballast. Factors influencing the spreading resistance of an electric current through the ballast have been examined. The influence of the electrical resistance of the ballast track circuit on the dependability and reliability of the equipment of systems of interval regulation and auto-lock has been analyzed. Methods of dealing with the fluctuation of electric resistance of insulation of the track circuit have been suggested.

Keywords: electrical resistance, ballast of railway track, rail circuit, interval regulation of movement of trains, automatic locking.

Введение

В связи с развитием экономики страны задача повышения пропускной способности транспортной системы вообще и железных дорог в частности становится всё более актуальной и выдвигается в ряд важнейших задач в поддержании бесперебойной работы железнодорожной транспортной системы. Пропускная способность железнодорожных перегонов и станций в значительной степени зависит от устойчивой работы систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП) и автоматической блокировки (АБ). Одним из основных элементов СИРДП и АБ являются рельсовые цепи, которые оказывают существенное влияние на надежность их функционирования [1].

Структурно представленные рельсовые цепи СИРДП и АБ (рис. 1) состоят из источника питания (ИП), путевого приемника (ПП) и рельсовых линий (РЛ), расположенных на шпалах и уложенных на балласте. Рельсовые цепи выполняют функции:

- а) датчиков свободности рельсового пути и целостности рельсовых линий;
- б) телемеханического канала связи между проходными светофорами, путевыми и локомотивными устройствами.

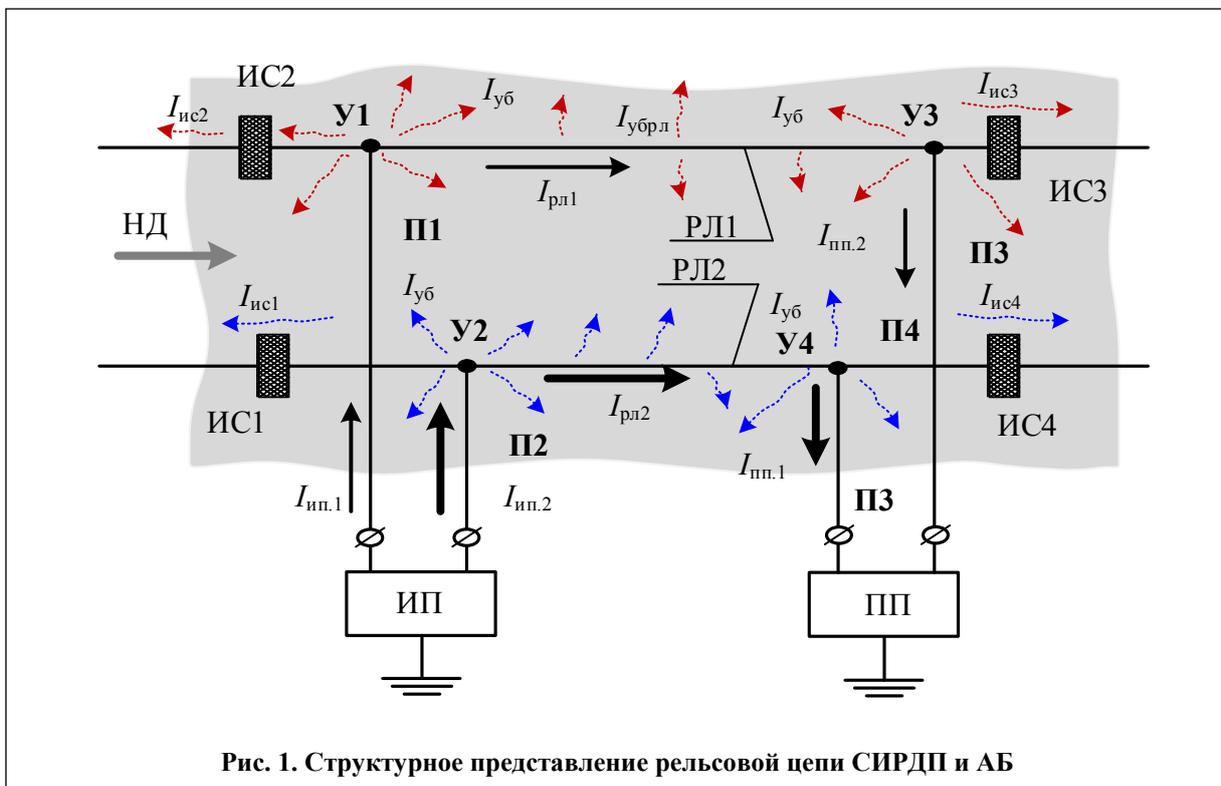


Рис. 1. Структурное представление рельсовой цепи СИРДП и АБ

Проводящие перемычки П1 и П2 соединяют выходы источника питания с рельсовыми линиями в узлах У1 и У2. Токи телемеханических сигналов $I_{ИП1}$ и $I_{ИП2}$ из узлов У1 и У2 растекаются по направлениям с ненулевой проводимостью (рис. 1):

- а) на токи $I_{РЛ1}$ и $I_{РЛ2}$ в рельсовые линии (элементы с наибольшей проводимостью);
- б) на токи $I_{ИС1}$ и $I_{ИС2}$ изолирующих стыков ИС1 и ИС2 (вследствие конечного сопротивления последних);
- в) на токи утечки $I_{УБ}$ балласта как следствие его паразитной проводимости.

Токи в рельсовых линиях $I_{РЛ1}$ и $I_{РЛ2}$ протекают до узлов У3 и У4 по пути растекаясь на токи утечки балласта $I_{УБ}$. В узлах У3 и У4 подключены проводящие перемычки

П3 и **П4**, соединяющие рельсовые линии со входами путевого приемника. Из узлов **У3** и **У4** токи $I_{рл1}$ и $I_{рл2}$ растекаются:

- а) на входные токи путевого приемника;
- б) на токи $I_{ис3}$ и $I_{ис4}$ изолирующих стыков ИС3 и ИС4;
- в) на токи утечки $I_{уб}$ балласта.

Таким образом, токи телемеханических сигналов, поступающие на ПП:

$$I_{пп1} = I_{ип1} - I_{ис\sigma 1} - I_{уб\sigma 1}, \quad I_{пп2} = I_{ип2} - I_{ис\sigma 2} - I_{уб\sigma 2}, \quad (1)$$

где $I_{ис\sigma 1}$, $I_{ис\sigma 2}$, $I_{уб\sigma 1}$, $I_{уб\sigma 2}$ – соответственно суммарные токи утечки через изолирующие стыки и балласт в рельсовых линиях.

Очевидно, что суммарные токи утечки через изостыки

$$I_{ис\sigma 1} = I_{ис1} + I_{ис3}, \quad I_{ис\sigma 2} = I_{ис2} + I_{ис4}, \quad (2)$$

а токи утечки балласта

$$I_{уб} \approx I_{убрл} = \int_0^L i_{уб}(l)dl, \quad (3)$$

где $i_{уб}(l)$ – закон изменения тока утечки от координаты на рельсовой линии, который зависит от электрических свойств балласта; L – длина рельсовой линии.

Следовательно, из формул (1) – (3) вытекает, что качество результатов приема и обработки путевым приемником информационных сигналов ограничено потерями в изолирующих стыках и утечкой балласта.

Влияние сопротивления балласта на надежность работы аппаратуры СИРДП и АБ подтверждается данными табл. 1 [1].

Таблица 1

Процентное соотношение отказов на железной дороге

<i>Отказ</i>	<i>Область охвата отказа</i>	<i>Количество отказов, %</i>
Неисправность рельсовой цепи	По сети железных дорог	60
	По сети железных дорог	16
Пониженное сопротивление изоляции рельсовой цепи	Отдельные участки железной дороги	65–68

Большое количество отказов рельсовых цепей приводит к убыткам из-за задержек поездов, которые в 5–8 раз превышают суммарные потери от повреждений остальных устройств железнодорожной автоматики [4].

Изучением физических особенностей возникновения и изменений сопротивления балласта занимались И.М. Кокоурин (1964 г.), А.П. Разгонов (1974 г.), С.В. Бушуев и В.И. Бушуев (2003 г.) [2, 1, 5]. Однако сведения, изложенные в их трудах, имеют ограниченный характер. Рассмотрение причин, влияющих на изменение сопротивления балласта железнодорожных путей, осуществлялось с помощью статистических данных, не раскрывая истинных причин процесса, а часть факторов, влияющих на флуктуацию сопротивления изоляции, не отражались. Проведенные исследования и анализ недостаточно полно отражают природу возникновения, характер флуктуации электрического сопротивления балласта рельсовой цепи и не соответствуют современному уровню развития способов обработки сигналов.

Поэтому рассмотрение закономерностей изменения сопротивления балласта остается актуальным. Учет флуктуаций сопротивлений изоляции рельсовой цепи R_y (рис. 1) может способствовать достижению более высокой надежности СИРДП и АБ за счет

применения сигналов относительно низкой мощности, что попутно снизит потери электроэнергии в рельсовых цепях.

Цель настоящей работы – исследование причин, характера и диапазона изменений электрического сопротивления балласта рельсовых цепей.

1. Электрохимическая природа проводимости токов утечки

Всякое вещество прохождению электрического тока – направленному движению электронов под действием электрического поля – оказывает противодействие, обусловленное их столкновениями, в зависимости от вида проводимости, с атомами, ионами или узлами кристаллической решетки. Потеря энергии, вызванная этими столкновениями, характеризуется электрическим сопротивлением вещества.

Рельсовая цепь как электротехническое устройство содержит проводники (металлы и электролиты) и диэлектрики. Металлами являются рельсы, детали рельсовых цепей (болты, накладки, соединители, перемычки), диэлектриками – резиновые прокладки между рельсами и шпалами железнодорожного пути; электролитами – вода с растворенными в ней солями, образующимися в процессе эксплуатации железнодорожных путей.

Химическое взаимодействие рельсов, элементов заземления, медных и латунных перемычек, обладающих электронной проводимостью, с веществами, находящимися в окружающей среде, со временем приводят к образованию слоя оксидов на поверхности стали, в состав которой входит железо и легирующие элементы.

Рассматривая процесс окисления стали на воздухе в присутствии или даже переизбытке влаги, остановимся на коррозии железа, ибо его процентное содержание в стали на порядок больше содержания иных элементов.

В процессе коррозии железа на воздухе образуются оксиды: FeO ; Fe_2O_3 и их комплекс Fe_3O_4 и свободный водород H_2 [7]. Металлы деталей верхнего строения пути и рельсы имеют различные окислительно-восстановительные потенциалы. Дождевая вода и роса имеют растворенные углекислый газ CO_2 и оксид серы SO_2 , в результате чего становятся электролитом.

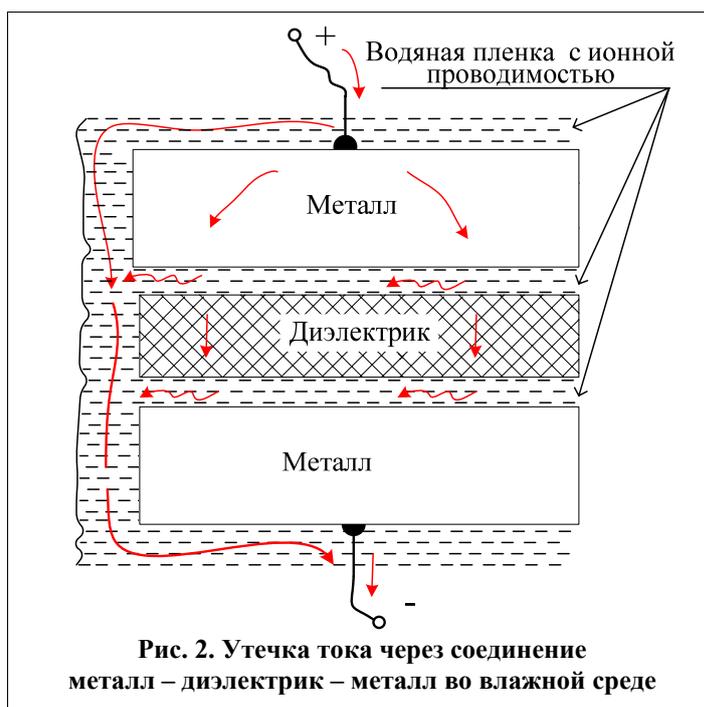
В процессе эксплуатации балласт, шпалы, земляное полотно насыщаются различными минералами, заключающимися в перевозимых грузах. Минералы обладают ионной проводимостью [9]. Например, если минерал содержит хлор Cl , то в присутствии влаги образуется активный ион Cl^- . В воде же всегда, вследствие электрической диссоциации, содержится ион водорода H^+ . Водный раствор активных ионов Cl^- и H^+ также представляет собой электролит.

Взаимодействие различных металлов с электролитом образует гальванический элемент (ГА). Также ГА образуется при погружении деталей из одного и того же металла в электролит с пространственным градиентом концентрации. В результате этого происходит электрохимическая коррозия, приводящая к «растворению» одной из металлических деталей [14]. Это повышает сопротивление контакта двух металлических деталей, например рельса и перемычки.

Изолирующие прокладки, подкладки, втулки выполняются из резины с добавлением реактопластов, полиамидной композиции, стеклоармированного полиамида, фенолформальдегидной смолы [13]. В процессе эксплуатации перечисленные диэлектрики теряют свои свойства, что повышает их электропроводность. Причинами деструкции являются окисление молекул, воздействие переменных механических усилий, фотохимические реакции из-за действия ультрафиолетовых лучей [8]. Процесс старения

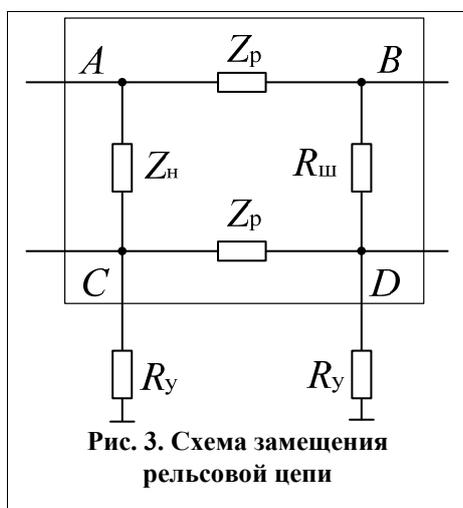
полимерных материалов заключается, главным образом, в деструкции молекул эластомера.

Следовательно, механическое соединение металл – диэлектрик (прокладка) – металл с точки зрения электрохимии имеет ещё два слоя электролита, а также в целом покрыта электролитом, которые становятся обходным путем с ионной проводимостью. Это соединение можно представить в виде электродов, помещенных в электролит (рис. 2). Протекание тока в электролите возможно при условии, что на границах раздела элементов с электронной и ионной проводимостью имеют место определенные электрохимические процессы.



2. Модель электрического сопротивления балласта

Эквивалентная схема рельсовой цепи (линии) включает (рис. 3): Z_p – сопротивление рельсовой нити, $R_{ш}$ – шунтовое сопротивление, Z_n – сопротивление нагрузочных элементов, R_y – сопротивление утечки току рельсовой цепи [3].



Рельсовая цепь представляет собой четырехполюсник. Эквивалентные погонные активные и реактивные сопротивления единичного участка цепи зависят как от свойств рельсовых линий, так и от сопротивления подстилающего балласта, на котором смонтирована рельсовая плеть. Из всех эквивалентных сопротивлений (рис. 3) наименьшей стабильностью обладают сопротивления растеканию электрического тока через балласт (R_y). Сопротивление R_y зависит от состояния балласта, от климата и текущих метеорологических условий, в том числе и от их суточных колебаний.

При передаче энергии в рельсовой цепи от ис-

точника питания к путевому приемнику часть ее теряется в промежуточной аппаратуре питающего и релейного концов, а большая часть потерь происходит в рельсовой линии (рис. 3). Потери энергии в рельсовой линии определяются:

а) удельным сопротивлением утечки – сопротивлением изоляции (балласта) рельсовой линии Z_y , (Ом/км)

$$Z_y = 1/Y_y = 1/[G_y + jB_y] = R_y + jX_y, \quad (4)$$

где G_y и jB_y , R_y и jX_y , – соответственно удельные активная и реактивная составляющие удельной комплексной проводимости Y_y и удельного комплексного сопротивления Z_y рельсовой линии.

б) удельным электрическим сопротивлением рельсов z_p , (Ом/км).

Утечка сигнального тока из рельса в рельс идет по сложной цепи, состоящей из элементов с различным типом электропроводности.

Электрохимической природой проводимости изоляции рельсовой линии объясняются затруднения ее точного аналитического расчёта (рис. 2). Поэтому определяются условия, при которых проводимость изоляции достигает максимума и минимума.

В общем случае индуктивная проводимость балласта пренебрежимо мала. Поэтому его удельная проводимость изоляции Y_y :

$$Y_y = G_y + j\omega C_y = |Y_y| e^{j\varphi_y}; \quad (5)$$

где C_y – эквивалентная ёмкость для токов утечки; ω – угловая частота сигнального тока, частота которого f .

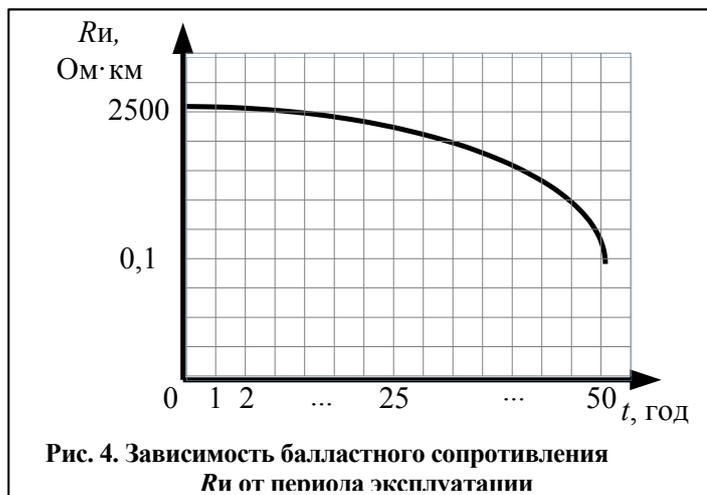
3. Факторы, влияющие на электрическое сопротивление балласта

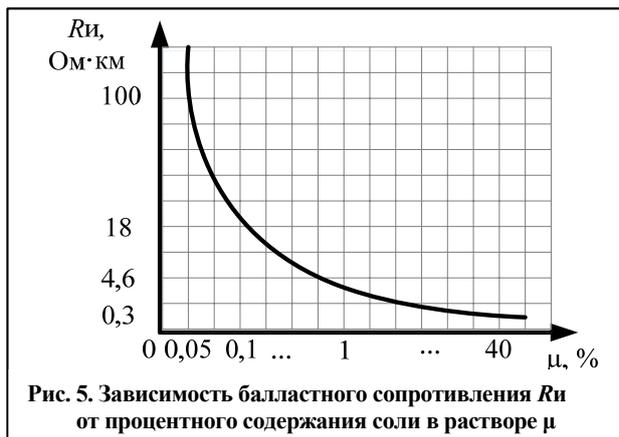
Таким образом, на величину сопротивления изоляции рельсовой цепи негативно сказываются:

- 1) период эксплуатации;
- 2) материал балластного слоя;
- 3) засоленность балласта;
- 4) климатические и метеорологические условия;
- 5) окисление стали;
- 6) старение резиновых прокладок;
- 7) степень соприкосновения костылей с рельсами.

Статистические данные [2] показывают, что процесс ухудшения изоляции рельсовых цепей идет на всех без исключения участках и всех рельсовых цепях в зависимости от периода эксплуатации (рис. 4).

Особенно резко снижается сопротивление изоляции рельсовых цепей на участках, где происходит интенсивный рост перевозок сыпучих грузов, а также на участках с солончаковыми почвами. На основании статистических данных [5] можно сказать,





что при увеличении скорости засоленности балласта скорость ухудшения изоляции возрастает (рис. 5). Это связано с тем, что электропроводность промерзшей грунтовой системы изменяется за счет миграции воды, направленной к фронту промерзания.

Улучшение условий протекания электрохимических процессов зависит от степени загрязнения балласта. Щебенистый балласт через несколько лет после укладки, загрязняясь песком, пылью, шлаком, углем и другими материалами, не всегда обеспечивает нормативное

сопротивление изоляции. Причем усредненная максимальная проводимость изоляции увеличивается с ростом срока службы верхнего строения пути по линейному закону. Наилучшим материалом для балластного слоя является щебень, хорошими изоляционными свойствами обладает гравий, при песчаном и асбестовом балласте сопротивление изоляции ниже (см. табл. 2) [5].

Таблица 2

Измеренные показатели сопротивления балласта в зависимости от материала балластного слоя

Материал балластного слоя	$R_{и}$, Ом·км
щебень	2,0
гравий	1,5
песок	1,0

В условиях эксплуатации сопротивление изоляции может изменяться в зависимости от метеорологических условий, таких как изменение влажности и температуры, на тысячи процентов (см. табл. 3) [5].

Таблица 3

Измеренные показатели сопротивления балласта в зависимости от метеословий

Состояние балластного слоя	$R_{и}$, Ом·км
мокрый	1
влажный	2
Сухой, слабо промерзший	50
Сильно промерзший	50–100

На основании работы [3], где были приведены измеренные значения сопротивления изоляции железнодорожных путей в соответствии с действующей в момент измерения температурой и влажностью (см. табл. 4, табл. 5), можно сказать, что максимальное сопротивление изоляции наблюдается при низкой температуре в сочетании с низкой влажностью, а максимальное снижение сопротивление изоляции – при положительных температурах в сочетании с повышенной влажностью. Это связано с тем, что при увеличении температуры увеличиваются тепловые колебания узлов кристаллической решетки, а также число свободных электронов и ионов в единице объема, следовательно, уменьшается удельное сопротивление.

Удельное сопротивление напрямую связано с температурным коэффициентом [3]

$$R_{и} = R_{и0}(1 + \alpha(t_2 + t_1)) ; \quad (5)$$

где $R_{и}$ – сопротивление изоляции после изменения температуры; $R_{и0}$ – удельное сопротивление изоляции до изменения температуры; α – температурный коэффициент сопротивления; t_2 – начальная температура; t_1 – измененное значение температуры.

Таблица 4

Измеренные показатели сопротивления балласта в зависимости от температуры при постоянной влажности 15 %

$t, ^\circ\text{C}$	20	10	0 (вода)	0 (лед)	-5...-15
$R_{и}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	72	99	138	300	790...330

Таблица 5

Зависимость сопротивления балласта от содержания влаги при $t = 17^\circ\text{C}$

$w, \%$	2,5	5	7,5	10	15	20	25	30
$R_{и}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	2500	1650	1000	530	190	120	85	64

Кроме того, колебания сопротивления изоляции определяется степенью соприкосновения костылей с рельсами и обусловлены изменением влажности в зазорах между ними, происходящим в течение нескольких секунд. При попадании влаги в эти зазоры все шпалы оказываются подключенными к рельсам, поэтому сопротивление изоляции снижается до минимума, который определяется сопротивлением самих шпал [12].

Причинами увеличения проводимости места контакта резина-металл являются старение резиновых прокладок, вызванное термоокислительными реакциями, окислением, активированным металлами переменной валентности, окислением, активизированным ультрафиолетовым излучением, а также солнечной радиацией [12]. Резиновая прокладка, стираясь и теряя эластичность под действием приведенных выше причин, становится уязвимой для протекания электрического тока через рельсы железнодорожного пути. Неудовлетворительное состояние резиновых прокладок между рельсами и шпалами железнодорожного пути негативно сказывается на величине сопротивления балласта.

Скорость старения изоляции рельсовых цепей несомненно зависит от электропроводности шпал в зоне костылей [10]. Это происходит за счет накопления солей под действием процесса испарения влаги с поверхности шпал, которая из балласта через подошву поступает с растворенными солями. Срок службы шпал по электропроводности обусловлен разной плотностью материала.

Образование окалины на поверхности рельса интенсивно снижает сопротивление балласта. Скорость роста окалины зависит не только от протекания химического процесса окисления стали, но и от условий передвижения ионов и атомов кислорода, т. е. от условий протекания физического процесса двусторонней диффузии [11], что ведет за собой возможное появление нецелостности рельса и, как следствие, утечки тока.

4. Способы борьбы с флуктуацией электрического сопротивления балласта

Основными методами борьбы с флуктуацией электрического сопротивления балласта принято считать подрезку балласта, которая ликвидирует прямой контакт между балластом и металлическими элементами рельсошпальной решетки, замену или промывку балласта, замену токопроводных шпал. Снизить скорость старения изоляции можно путем повышения диэлектрических свойств шпал и балласта; применения изо-

лирующих элементов, менее подверженных реакциям окисления, между рельсом и шпалами, а также применять меры для искоренения электрохимической коррозии и появления окалины на поверхности металлических деталей верхнего строения пути и рельсов.

Учитывая большие затраты средств, необходимость прекращения движения на время проведения работ и ограничение скорости движения поездов на время стабилизации, эффективность применения данных способов оказалась низка и в реальных условиях не имеет практического значения, именно по этой причине существует система контроля сопротивления балласта и целостности рельс железнодорожной линии с применением сигналов с линейной частотной модуляцией [14]. Применение данной системы позволяет осуществлять непрерывный, одновременный и в реальном масштабе времени контроль сопротивления балласта и целостности рельсового пути, благодаря чему существенно повысить показатели безопасности железнодорожных перевозок, локализовать неисправность рельсового пути или несоответствие техническим требованиям сопротивления балласта с точностью до контролируемого участка, автоматизировать подстройки параметров сигналов устройств сигнализации, централизации и блокировки в зависимости от электрических свойств балласта, существенно сократить время задержки поездов [15].

Авторы предполагают, что перспективными направлениями обеспечения надежной работы рельсовых цепей в реальном масштабе времени являются: а) применение непрерывных систем контроля сопротивления балласта; б) использование для построения СИРДП и АБТ алгоритмов, робастных к изменениям сопротивления балласта.

Вывод

Исследование причин, характера и диапазона изменений электрического сопротивления балласта рельсовых цепей позволяет достаточно полно отразить природу его возникновения, причины и характер его флуктуации. Игнорирование флуктуации сопротивления балласта железнодорожных путей возможно путем формирования определенного вида сигналов для фиксирования порога занижения параметра сопротивления изоляции рельсовой линии.

Библиографический список

1. *Разгонов А.П.* Методика оценки надежности работы рельсовых цепей при пониженном сопротивлении балласта. – Тр. ЦНИИ, 1974. – Вып. 512. – С. 11–25.
2. *Кокурин И.М.* К вопросу об электрохимической природе сопротивления балласта в рельсовых цепях переменного тока. – Тр. ЛИИЖТ, 1964. – Вып. 223. – С. 3–25.
3. *Кириленко А.Г.* Электрические рельсовые цепи : учеб. пособие. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 114 с.
4. Единый реферат-центр в России и СНГ – [электронный ресурс] – режим доступа <http://referatwork.ru/refs/source/ref-17068.html> – Железнодорожные системы.
5. *Бартоломей А.А.* Механика грунтов : учеб. издание / АСВ, Москва, 2004. – С. 421–425.
6. *Краев А.П.* Основы геоэлектрики : учеб. пособие для студентов геофизической специальности геологоразведочных вузов и геологических факультетов. – Изд. 2-е исправ. и доп. – Л. : Изд-во «Недра», 1965. – С. 116–181.
7. *Павлов В.В.* Дефекты и качество рельсовой стали. – Справ. изд. – М : Теплотехник, 2006 – 218 с.
8. Справочник химика 21 – [электронный ресурс] – режим доступа <http://chem21.info/info/309244/> – Химия и химическая технология.
9. *Глинка Н.Л.* Общая химия : учеб. пособие. – Изд. стер. – М. : КНОРУС, 2012. – С. 237–264.

10. РемСтройПуть – [электронный ресурс] – режим доступа <http://www.rails.ru/Spravochnye-materialy/Razdelnoe-promezhutochnoe-relsovoe-skreplenie-dlya-zhelezobetonnyh-i-derevyannyh-shpal> – База комплектации материалами верхнего строения пути.
11. *Никольский А.Б., Суворов А.В.* Химия : учебник для вузов – Л. : Изд-во «Химиздат», 2001. – StudFiles – [электронный ресурс] – режим доступа <http://www.studfiles.ru/preview/1493363/> – Файловый архив для студентов.
12. FindPatent.ru – [электронный ресурс] – режим доступа – <http://www.findpatent.ru/patent/238/2386650.html> – Патентный поиск
13. *Козлов Д.Ю.* Антикоррозийная защита. – Екатеринбург : Изд-во ООО «Оригами», 2013. – С. 343–440.
14. *Мудрая Н.Г., Марюхненко В.С.* Применение шумоподобных сигналов для контроля сопротивления балласта железнодорожных путей : сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» – Красноярск : СФУ, 2015. – С. 84–87.
15. *Марюхненко В.С.* Информационное обеспечение подвижных транспортных средств на основе интегрированных навигационных систем / В.С. Марюхненко, Ю.Ф. Мухопад, В.В. Демьянов, Б.М. Миронов ; под ред. В.С. Марюхненко. – Новосибирск : Наука, 2014. – 256 с.



ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ



Математика
Физика
Астрономия
Фармацевтические науки
Науки о Земле



УДК 541.128.3

Д.О. Некрасова^{^1}, Д.В. Заяц^{^2}

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА И НЕКОТОРЫХ ЧИСЛОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАЙНИКА ДВУЛИСТНОГО

Аннотация. Майник двулистный (*Maianthemum bifolium* L., *Asparagaceae*) – растение, широко применяемое в народной медицине, содержит стероидный сапогенин диосгенин, являющийся сырьевым компонентом в синтезе стероидных гормонов и обладающий обширным спектром фармакологической активности. Перспективы применения майника двулистного в медицине и фармацевтической промышленности определили необходимость исследования ресурсного потенциала растения и качества растительного сырья. В ходе проведенных исследований определены ресурсы майника двулистного, произрастающего в Шенкурском районе Архангельской области, и установлены числовые показатели воздушно-сухого растительного сырья.

Ключевые слова: майник двулистный, растительные ресурсы, числовые показатели, диосгенин.

Об авторах:

^{^1}Д. О. Некрасова – студентка 5-го курса фармацевтического факультета СГМУ, Архангельск, darja.nek@yandex.ru.

^{^2}Д.В. Заяц – студент 5-го курса фармацевтического факультета СГМУ, Архангельск, zayatsdanil@yandex.ru.

D.O. Nekrasova, D.V. Zaiats

DETERMINATION OF RESOURCE POTENTIAL AND SOME NUMBER INDICATORS OF *MAIANTHEMUM BIFOLIUM*

Abstract. *Maianthemum bifolium* is a plant widely used in folk medicine. It contains a steroid sapogenin diosgenin, which is a raw material component in the synthesis of steroid hormones and has an extensive range of pharmacological activity. Prospects of *Maianthemum bifolium* in medicine and pharmaceutical industry have identified the need to study the resource potential of the plant and the quality of raw material. In the course of the research studied the resource potential of *Maianthemum bifolium* grown in the Shenkursk area of the Arkhangelsk region, set the number indicators of air-dried plant material.

Keywords: *Maianthemum bifolium*, plant resource, number indicators, diosgenin.

Введение

Майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) семейства спаржевые (*Asparagaceae*)) (майник) – многолетнее травянистое растение, цветет в июне, преимущественные места обитания – незаболоченные еловые, сосновые и смешанные леса [1].

В народной медицине майник применяют при сердечно-сосудистых заболеваниях, водянке, болезнях почек, простудных заболеваниях, при абсцессах, ушибах, опухлях и конъюнктивитах; используют в качестве жаропонижающего, обезболивающего, противовоспалительного и кровоостанавливающего средства [1, 2].

Одним из биологически активных веществ растения является стероидный сапогенин – диосгенин [3], обладающий широким спектром фармакологической активности [4]. Недавние исследования демонстрируют не только наличие профилактического и

терапевтического действия соединения в отношении некоторых форм рака, но и эффективность диосгенина при сердечно-сосудистых заболеваниях, диабете второго типа, нейродегенеративных процессах и аллергических реакциях [4].

Диосгенин является основным соединением для синтеза стероидных гормонов и их аналогов. В настоящее время в качестве сырья для его получения используют корневища дикорастущих и культивируемых видов диоскорей (*Dioscorea composita*, *D. floribunda*, *D. tepinapensis*, *D. prazeri*, *D. sylvatica*, *D. belizensis*, *D. zingiberensis*), основными поставщиками которых являются Мексика, страны Центральной Америки, Индия и Китай.

В нашей стране стероидным сырьем для синтеза гормонов служит соласодин, получаемый из культивируемого паслена дольчатого *Solanum laciniatum*. Однако производство соласодина нерентабельно, поэтому недостаток исходного сырья для медицинской промышленности восполняется за счет импортируемого диосгенина [5].

Таким образом, майник представляет собой перспективный вид растительного сырья (РС) для выделения диосгенина, что приобретает особое значение в условиях реализации государственной программы импортозамещения.

Перспективы применения майника в медицине и фармацевтической промышленности определяют необходимость исследования ресурсного потенциала и качества РС, включая числовые показатели.

Целью настоящего исследования являлось ресурсоведческое изучение майника, произрастающего в Шенкурском районе Архангельской области.

1. Материалы и методы исследования

Шенкурский район расположен на юге Архангельской области. Общая площадь района составляет около 11 300 км², площадь лесного фонда – более 945 000 га, около 40 % которой занимают болота, более 5 % – реки (рис. 1).

Ресурсоведческие исследования майника, включающие определение урожайности, биологического и эксплуатационного запасов, а также возможный объем ежегодной заготовки, проводили в течение летнего периода 2015 года.

Поскольку популяции майника расположены неравномерно, определяли площадь всего участка произрастания, затем рассчитывали процент площади, занятый изучаемым видом. С этой целью исследуемый участок пересекали параллельными и перпендикулярными маршрутными ходами и в пределах каждого отрезка измеряли размер куртины. Суммируя показатели, полученные на всех отрезках, вычисляли процент площади, занятой популяциями исследуемого растения, и рассматривали ее как одну заросль [6].

В народной медицине в качестве РС используют надземные органы майника, поэтому урожайность определяли методом учетных площадок. С этой целью закладывали по 25 площадок площадью 0,25 м², используя круги из проволоки диаметром 0,56 м, равномерно располагая их на параллельных ходах [7].

С каждой учетной площадки собирали всю сырьевую фитомассу за исключением ювенильных и поврежденных экземпляров, и взвешивали с точностью до ± 5 % [6]. Поскольку максимальное и минимальное значения массы РС, собранной с одной учетной площадки, не отличались более чем в 7 раз, количество учетных площадок не увеличивали [7].



Рис. 1. Карта Шенкурского района Архангельской области

Урожайность майника рассчитывали как величину интервала среднего результата при заданном значении доверительной вероятности 95 % с учетом числового значения критерия Стьюдента. Биологический запас вычисляли как произведение средней плотности запаса сырья на общую площадь заросли.

Величину эксплуатационного запаса определяли умножением площади заросли на нижний предел значения урожайности с учетом ориентировочного процента выхода воздушно-сухого сырья от свежесобранного.

Возможный ежегодный объем заготовки РС вычисляли делением эксплуатационного запаса на оборот заготовки. За оборот заготовки принимали период, включающий год заготовки, и число лет, необходимое для полного восстановления запасов сырья (6 лет).

Образцы воздушно-сухого растительного сырья – травы майника, заготовленные на исследуемой территории в фазу цветения растения и высушенные в затененном, хорошо проветриваемом помещении, использовали для определения числовых показателей.

Влажность РС определяли методом высушивания в сушильном шкафу лабораторном «ШС–40 ПЗ» (Россия), в соответствии с требованиями ОФС «Определение влажности лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов» [8].

Для определения общей золы использовали муфельную печь «ЭКПС-10» (Россия) с одним временным диапазоном и двухэтапным нагревом со стабилизацией температуры, руководствуясь ОФС «Общая зола» [9].

Золу, нерастворимую в кислоте хлористоводородной, определяли по методике ОФС «Зола, нерастворимая в хлористоводородной кислоте» [10]. За окончательный результат принимали среднее значение шести параллельных определений.

2. Результаты

В ходе экспедиционного обследования территории Шенкурского района было установлено, что заросли майника приурочены к незаболоченным смешанным хвойно-мелколиственным лесам с преобладанием ели. Лиственные культуры чаще всего представлены осиной, березой и ольхой. Основные заросли исследуемого растения с плотностью не менее сор 1 обнаружены в хвойных и смешанных лесах вблизи озер Кулгозеро, Юмгозеро, Квалозеро, Большое Искозеро, Малое Водлесское, Большое Черное, Долгое, Ворбас и Островское; в лесах по берегам рек Ледь, Вадлеша и Ворбас; вблизи болот Симонское, Лум и Рябиновое.

Для расчета эксплуатационного запаса устанавливали ориентировочный выход воздушно-сухого сырья майника (табл. 1).

Таблица 1

Результаты определения ориентировочного выхода воздушно-сухого сырья майника двулистного

Масса сырья до высушивания, г	Масса сырья после высушивания, г	Ориентировочный выход воздушно-сухого сырья, %	Метрологические характеристики
100,4095	21,2870	21,2	$\bar{x} = 21,67$ $S^2 = 0,175$ $S_x = 0,171$ $\Delta\bar{x} = 0,438$ $\varepsilon = 2,02\%$
105,0832	23,4336	22,3	
98,9558	21,3745	21,6	
103,2556	21,9934	21,3	
100,5725	22,1260	22,0	
102,2450	22,0849	21,6	

Таким образом, установлено, что ориентировочный выход воздушно-сухого сырья для майника составляет 21,7 %.

Результаты ресурсоведческого исследования майника двулистного представлены в табл. 2.

Таблица 2

Определение ресурсов майника двулистного на территории Шенкурского района Архангельской области

Исследуемая территория, прилегающая	Площадь зарослей, га	Урожайность, кг/га	Биологический запас, кг	Эксплуатационный запас, кг	Возможный объем ежегодной заготовки, кг
1	2	3	4	5	6
к оз. Кулгозеро	364,56	56,5±6,3	25191,1	3468,1	578,0
к оз. Юмгозеро	252,30	355,8±9,2	94410,7	18446,8	3074,5
к оз. Квалозеро	164,50	76,1±2,1	13209,4	2563,0	427,2
к оз. Большое Искозеро	365,20	120,3±4,5	47220,4	8808,2	1468,0

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6
к оз. Малое Водлеское	250,80	101,9±8,2	29669,6	4646,8	774,5
к оз. Большое Черное	160,40	57,8±2,1	9944,8	1863,1	310,5
к оз. Долгое	364,52	87,1±3,1	34009,7	6390,4	1065,1
к оз. Ворбас	250,60	279,3±5,2	72598,8	14602,6	2433,8
к оз. Островское	164,30	65,7±7,4	13226,2	1812,2	302,0
к реке Ледь (правый берег)	130,20	301,4±6,4	40908,8	8142,7	1357,1
к реке Ледь (левый берег)	90,86	320,1±7,8	30501,7	5995,4	999,2
к реке Вадлеша (правый берег)	100,5	231,2±3,4	23919,0	4887,1	814,5
к реке Вадлеша (левый берег)	53,70	367,3±5,1	20271,8	4155,5	692,6
к реке Ворбас (правый берег)	98,65	298,5±6,2	30670,3	6116,1	1019,3
к реке Ворбас (левый берег)	58,90	68,2±9,6	5147,9	625,4	104,2
к болоту Симонское	102,65	134,3±6,2	15058,8	2711,6	451,9
к болоту Лум	100,35	198,2±7,1	21314,3	4001,2	666,9
к болоту Рябиновое	97,85	145,2±6,8	15538,6	2790,5	465,1
	3170,84		542811,9	102026,7	17004,4

Таким образом, на обследованной территории общая площадь произрастания майника составила 3170,84 га. Биологический запас исследуемого растения – 542 812 кг, эксплуатационный запас, с учетом ориентировочного процента выхода воздушно-сухого сырья от свежесобранного – 102 027 кг, возможный объем ежегодной заготовки, с учетом оборота заготовки, – немногим более 17 т воздушно-сухого сырья.

Результаты определения числовых показателей воздушно-сухого РС – травы майника представлены в табл. 3–5.

Таблица 3

Результаты определения влажности воздушно-сухого сырья травы майника двулистного

Масса пусто-го бюкса, г	Масса бюкса с сырьём до высушивания, г	Масса бюкса с сырьём после высушивания, г	Влажность, %	Метрологические характеристики
42,045	42,9980	42,9228	7,90	$\bar{X} = 7,61$ $S_{\bar{x}} = 0,07$ $\Delta x = 0,17$ $\varepsilon = 2,28\%$
45,780	46,7386	46,6663	7,54	
44,457	45,4327	45,3605	7,40	
44,956	45,9220	45,8484	7,62	
42,046	43,0013	42,9283	7,65	
44,956	45,9090	45,8370	7,56	

Таблица 4

Результаты определения общей золы воздушно-сухого сырья травы майника двулистного

Масса пустого тигля, г	Масса тигля с сырьём до прокаливания, г	Масса тигля с сырьём после прокаливания, г	Общая зола, %	Метрологические характеристики
28,5801	29,5028	28,6435	6,87	$\bar{X} = 7,18$ $S_{\bar{x}} = 0,07$ $\Delta x = 0,18$ $\varepsilon = 2,47\%$
33,3390	34,2654	33,4065	7,28	
28,5780	29,5220	28,6460	7,20	
33,3383	34,2795	33,4075	7,35	
32,1027	33,0354	32,1703	7,25	
34,5554	35,4895	34,6220	7,13	

Таблица 5

Результаты определения золы, нерастворимой в хлористоводородной кислоте, воздушно-сухого сырья травы майника двулистного

Масса пустого тигля, г	Масса тигля с сырьём до прокаливания, г	Масса тигля с сырьём после прокаливания, г	Общая зола, %	Метрологические характеристики
28,5801	29,5028	28,5813	0,130%	$\bar{X} = 0,12$ $S_{\bar{x}} = 0,002$ $\Delta x = 0,006$ $\varepsilon = 5,28\%$
33,3390	34,2654	33,3401	0,119%	
28,5780	29,5220	28,5791	0,117%	
33,3383	34,2795	33,3394	0,117%	
32,1027	33,0354	32,1039	0,129%	
34,5554	35,4895	34,5565	0,118%	

3. Выводы

В ходе ресурсоведческого исследования майника на территории Шенкурского района Архангельской области было установлено, что общая площадь зарослей исследуемого растения составляет более 3000 га, на которой возможна ежегодная заготовка растения в объеме, превышающем 17 т воздушно-сухого сырья.

Определены основные числовые показатели воздушно-сухого РС майника: влажность (7,6 %), общая зола (7,2 %), зола, нерастворимая в 10 % растворе хлористоводородной кислоты (0,12 %).

Таким образом, майник двулистный представляет перспективный вид РС, обладающий широким спектром фармакологической активности и являющийся возможным сырьем для выделения диосгенина.

Библиографический список

1. Астрологова Л.Е., Феклистов П.А. Лекарственные растения Севера. – Архангельск : Изд-во АГТУ, 2002. – 156 с.
2. Майник двулистный (ландыш двулистный) – *Maianthemum bifolium* L. Семейство лилейные – Liliaceae [Электронный ресурс] / Фитотерапевт. – Режим доступа : <http://www.fito-terapevt.ru/rasteniya-serdechnye-glikozidy/maianthemum-bifolium>.
3. Sibiga A. Steroid saponins of *Maianthemum bifolium* i. Isolation of the saponin fraction and identification of aglycones and sugars / A. Sibiga, J. Sendra, Z. Janeczko // *Herba Polonica*. – 1986. – № 31(1–2). – P. 21–28.
4. Hen Y. Advances in the pharmacological activities and mechanisms of diosgenin / Y. Hen, Y-M. Tang, S-L. Yu [et al.] // *Chines. J. of Nat. Medicines*. – 2015. – № 13(8). – P. 578–587.
5. Васильева И. С. Стероидные гликозиды растений и культуры клеток диоскореи, их метаболизм и биологическая активность / И. С. Васильева, В. А. Пасешниченко // *Успехи биол. химии*. – 2000. – Т. 40. – С. 153–204.

6. Струсовская О.Г. Оценка ресурсов листьев *Vaccinium vitis-idaea* (Ericaceae) на островах Соловецкого архипелага / О.Г. Струсовская // Ж. Раст. ресурсы. – 2012. – № 2. – С. 207–211.
7. Струсовская О.Г. Ресурсоведческие и фитохимические исследования перспективных видов сырья дикорастущих растений островов Соловецкого архипелага : дисс. ... д-ра фарм. наук / О.Г. Струсовская. – Волгоградский гос. мед. ун-т. – Пятигорск, 2014. – 412 с.
8. Определение влажности лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов. ОФС.1.5.3.0007.15.
9. Общая зола. ОФС.1.2.2.2.0013.15.
10. Зола, нерастворимая в хлористоводородной кислоте. ОФС.1.5.3.0005.15.



УДК 543.42.062

А.И. Илларионов^{^1}, *Е.А. Илларионова*^{^2}, *И.П. Сыроватский*^{^3}

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПИРЛИНДОЛА

Аннотация. Разработана унифицированная методика спектрофотометрического определения пирлиндол в субстанции и таблетках, отличающаяся использованием в качестве образца сравнения фенолфталеина или бензойной кислоты. Обоснованы оптимальные условия определения: растворитель – 0,1М HCl или C₂H₅OH, аналитическая длина волны – 276 нм. Определены коэффициенты пересчета, представлены градуировочные графики. Относительное стандартное отклонение разработанной методики для субстанции составило менее 0,005, для таблеток – 0,033.

Ключевые слова: спектрофотометрическое определение, оптический образец сравнения, пирлиндол, фенолфталеин, бензойная кислота.

Об авторах:

^{^1} Д. ф-м. н., профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, e-mail: illarionov_a@irgups.ru.

^{^2} Д. х. н., профессор, заведующая кафедрой фармацевтической и токсикологической химии, Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск, e-mail: Illelena@rambler.ru.

^{^3} К. фарм. н., доцент, доцент кафедры фармацевтической и токсикологической химии, Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск, e-mail: ips1961@rambler.ru.

A.I. Illarionov, E.A. Illarionova, I.P. Syrovatsky

SPECTROPHOTOMETRIC DETERMINATION OF PIRLINDOL

Abstract. A unified method of spectrophotometric determination of pirlindol in substance and tablets, characterized in using as a comparison the phenolphthalein or benzoic acid has been worked out. Grounded optimal conditions for determination: solvent – 0.1 M HCl or C₂H₅OH, analytical wavelength – 276 nm have been confirmed. Determined conversion factors have been denetermined, calibration curves are presented. The relative standard deviation of the developed technique for the substance is less than 0,005, for tablets – 0.033.

Keywords: spectrophotometric determination of optical comparison sample pirlindol, phenolphthalein, benzoic acid.

Введение

Одним из широко применяемых в медицинской практике препаратов является антидепрессивное средство пирлиндол (2, 3, 3а, 4, 5, 6 – гексагидро-8 метил-1-Н пиразино – 3, 2, 1 – j, k карбазола гидрохлорид) [1]. Для количественного определения пирлиндола в субстанции рекомендован метод титрования в среде муравьиной кислоты и уксусного ангидрида [2]. Предлагаемая методика требует использования высокотоксичных растворителей. Определение пирлиндола в таблетках проводится спектрофотометрическим методом, основанным на способности пирлиндола поглощать свет в УФ области спектра [3].

Использование спектрофотометрии для определения пирлиндола в субстанции требует наличия государственных стандартных образцов (образцов сравнения), выпуск которых является трудоемким и дорогостоящим (малодоступным для многих лабораторий).

В связи с вышеотмеченным, целью настоящей работы является разработка унифицированной методики количественного определения пирлиндола в субстанции и таблетках спектрофотометрическим методом с использованием оптических образцов сравнения.

1. Материалы и методы

В работе использовали пирлиндол в субстанции и таблетках, отвечающие требованиям фармакопейных статей [2, 3], бензойную кислоту, фенолфталеин квалификации ч.д.а., 0,1М раствор натрия гидроксида, приготовленные из фиксанала; спирт этиловый 95 %; воду очищенную.

Электронные спектры регистрировали на спектрофотометре СФ-2000. Оптическую плотность растворов измеряли на спектрофотометре СФ-2000 в кюветках толщиной 1 см на фоне растворителя. Величину рН контролировали с помощью универсального иономера ЭВ-74.

2. Результаты и обсуждение

С целью оптимизации условий спектрофотометрического определения пирлиндола нами были изучены спектры поглощения растворов пирлиндола в интервале рН 1,1–13,0 в спектральной области 200–400 нм (рис. 1, [4]). Из приведенных на рис. 1 спектров поглощения пирлиндола видно, что при рН 12,1 максимумы поглощения находятся в области 232 и 289 нм.

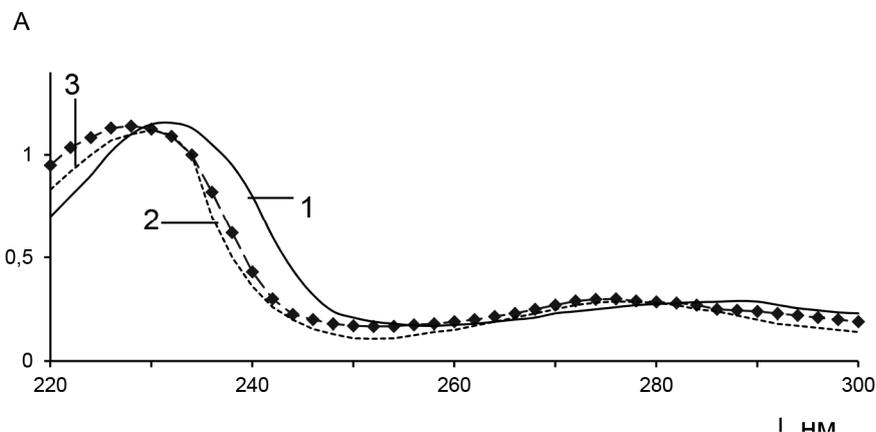


Рис. 1. Спектры поглощения 0,002 % раствора пирлиндола при рН: 1 – 12,1; 2 – 1,6; 3 – 6,5 (C₂H₅OH)

Снижение рН до 1,6 обуславливает образование ионизированной формы пирлиндолла и сопровождается гипсохромным смещением максимумов поглощения в области 228 и 276 нм. Спектр поглощения спиртового раствора пирлиндолла (рН 6,5) характеризуется двумя полосами поглощения с максимумами поглощения в области 230 и 276 нм. Из рис. 2 видно, что интенсивность поглощения незначительно изменяется для растворов пирлиндолла с рН 1-4, практически не меняется для растворов пирлиндолла с рН 4-10 и увеличивается для растворов пирлиндолла с рН >11.

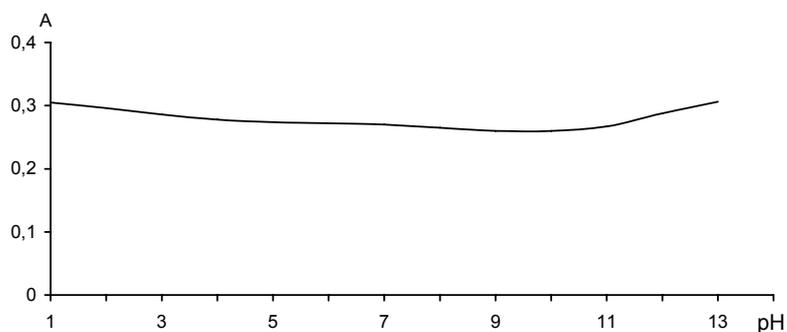


Рис. 2. Зависимость интенсивности поглощения 0,002 % раствора пирлиндолла от рН

Исследования показали, что наиболее стабильны растворы пирлиндолла с рН 1,6–6,5 и 11,5–12,1. При хранении таких растворов более трех суток не наблюдается изменения спектральных полос поглощения, но происходит незначительное снижение интенсивности поглощения. Раствор пирлиндолла в спирте с рН 6,5 оказался также стабильным в течение трех суток. Поэтому авторы остановились на растворах пирлиндолла с рН 1,6 (растворитель 0,1М НСl), с рН 6,5 (растворитель С₂Н₅ОН) и с рН 12,1 (растворитель 0,1 М NaOH).

Градуировочные графики (рис. 3, кривые 1 и 2) показывают линейность поглощения растворов пирлиндолла в диапазоне 1–5 мг/мл.

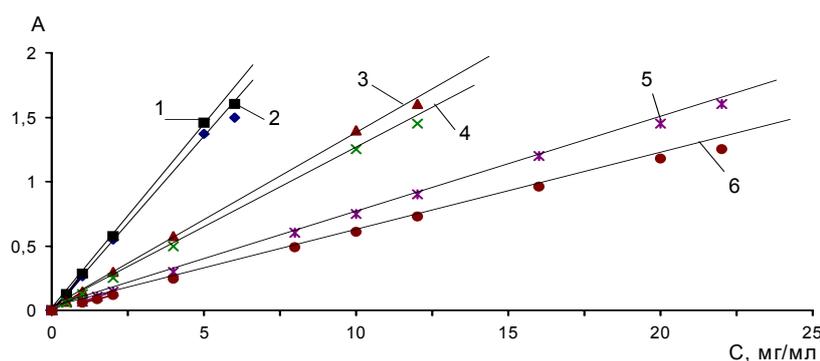


Рис. 3. Градуировочные графики для определения пирлиндолла (1,2), фенолфталеина (3, 4) и бензойной кислоты (5,6).

Растворители: 1, 3, 5 – С₂Н₅ОН; 2, 4, 6 – 0,1 М НСl

На основании разработанной нами в работах [4–8] методики выбора внешних образцов сравнения и предварительно проведенных экспериментов для количественного определения пирлиндол в субстанции спектрофотометрическим методом в качестве оптических образцов сравнения были выбраны фенолфталеин и бензойная кислота квалификации ч.д.а. Спектры поглощения образцов сравнения представлены на рис. 4 и 5. Спектр поглощения фенолфталеина (рис. 4 [4–8]) в представленных растворителях характеризуется одной полосой поглощения с максимумом поглощения при 275 нм. В 0,1 М растворе NaOH спектр поглощения фенолфталеина характеризуется тремя полосами поглощения с максимумами при 245, 294 и 554 нм и минимумами при 283 и 540 нм, что объясняется изменением химической структуры фенолфталеина и появлением хромофорной группировки атомов. Наиболее стабильны растворы фенолфталеина в 0,1 М растворе HCl и этиловом спирте.

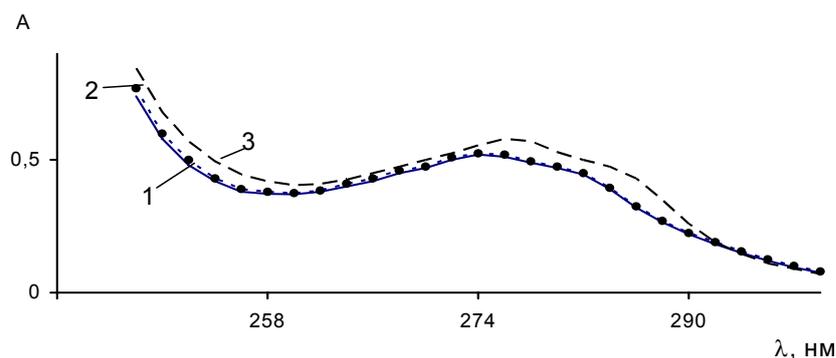


Рис. 4. Спектры поглощения 0,004 % раствора фенолфталеина
Растворители: 1 – H₂O; 2 – 0,1М HCl; 3 – C₂H₅OH

Спектр поглощения бензойной кислоты (рис. 5 [4–8]) в представленных растворителях характеризуется одной полосой поглощения. При переходе от кислого значения рН к щелочному наблюдается гипсохромное смещение максимума поглощения до 270 нм. Это объясняется тем, что ионизированная и неионизированная формы бензойной кислоты имеют различное электронное строение. Наиболее стабильна бензойная кислота в 0,1 М растворе HCl и в этиловом спирте.

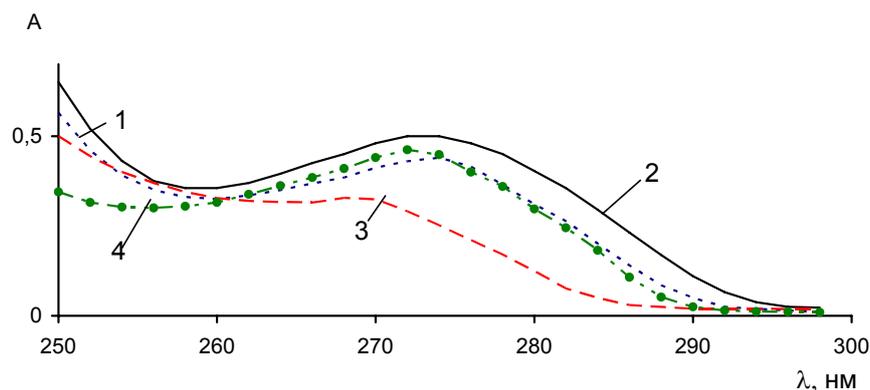


Рис. 5. Спектры поглощения 0,008 % раствора бензойной кислоты
Растворители: 1 – 0,1 МHCl; 2 – H₂O; 3 – 0,1М NaOH; 4 – C₂H₅OH

Градуировочные графики (рис. 3, кривые 3 и 4) показывают линейность поглощения растворов фенолфталеина в 0,1М HCl и этиловом спирте в диапазоне 1–10 мг/мл, а

растворов бензойной кислоты (рис. 3, кривые 5 и 6) – в 0,1М HCl в диапазоне 1–16 мг/мл и этиловом спирте в диапазоне 1–20 мг/мл.

Оптимальные области поглощения, в которых выбранные химические соединения можно использовать в качестве образцов сравнения, были определены на основании разработанных нами условий выбора образцов сравнения [4, 5]. Рассчитано, что такой областью для фенолфталеина является интервал 268–282 нм, а для бензойной кислоты – 268–280 нм.

Аналитическая длина волны пирлиндолола ($\lambda_{\max} = 276$ нм) входит в интервал, оптимальный для фенолфталеина и бензойной кислоты. Как указывалось выше, растворы пирлиндолола, фенолфталеина и бензойной кислоты стабильны в 0,1 М растворе HCl и этиловом спирте. Поэтому авторы разработали методики количественного определения пирлиндолола в субстанции и таблетках с использованием в качестве образца сравнения фенолфталеина либо бензойной кислоты для двух растворителей – 0,1М HCl и этиловый спирт.

Удельные показатели поглощения пирлиндолола и образцов сравнения фенолфталеина и бензойной кислоты не совпадают, поэтому в формулу количественного определения содержания пирлиндолола в субстанции или таблетках необходимо ввести коэффициент пересчета, который рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{E_{1\text{см}}^{1\%oc}}{E_{1\text{см}}^{1\%ocsv}}, \quad (1)$$

где $E_{1\text{см}}^{1\%oc}$ – удельный показатель поглощения образца сравнения (фенолфталеина или бензойной кислоты при аналитической длине волны (276 нм)), $E_{1\text{см}}^{1\%ocsv}$ – удельный показатель поглощения образца сравнения вещества (пирлиндолола) при аналитической длине волны (276 нм). Рассчитанные значения коэффициента пересчета пирлиндолола по фенолфталеину и бензойной кислоте в различных растворителях представлены в табл. 1.

Разработанная методика была использована для определения пирлиндолола в субстанции и таблетках (табл. 2).

Видно, что результаты, полученные по разработанной методике и методике нормативного документа [2, 3], хорошо согласуются. Сравнение дисперсий двух выборочных совокупностей при помощи F-распределения при $f_1 = f_2 = 7$ и $P = 99\%$ показало, что $F_{\text{экс}} = 1,16$ для субстанции и $F_{\text{экс}} = 3,34$ для таблеток при $F_{\text{табл}} = 8,47$ [9]. Следовательно, воспроизводимость указанных методик одинакова. Следует отметить, что разработанные нами методики являются менее трудоемкими, не требуют токсичных и дорогостоящих реактивов.

Таблица 1

Значения коэффициентов пересчета пирлиндолола по различным образцам сравнения (n = 10)

Образец сравнения	Растворитель	Коэффициент пересчета
Фенолфталеин	0,1М HCl	0,4710±0,0020
Бензойная кислота	0,1М HCl	0,2890±0,0075
Фенолфталеин	C ₂ H ₅ OH	0,4820±0,0018
Бензойная кислота	C ₂ H ₅ OH	0,2040±0,0010

Таблица 2

Результаты определения пирлиндола в субстанции и таблетках ($n = 7$, $P = 0,95$)

Объект исследования	Результаты определения						Нормативное содержание, % [2, 3]
	по разработанной методике				по методике нормативного документа [2,3]		
	Образец сравнения	Растворитель	Содержание, %	S_r	Содержание, %	S_r	
Субстанция пирлиндола	фенолфта- леин	0,1М НСl	99,1± 0,5	0,005	99,4± 0,7	0,01	99,0–100,5
		C ₂ H ₅ ОН	99,4± 0,2	0,002			
		0,1М НСl	99,7± 0,4	0,004			
Таблетки пирлиндола по 0,025 г	бензойная кислота	C ₂ H ₅ ОН	99,6± 0,4	0,004	99,8±1,9	0,02	90,0–110,0
		0,1М НСl	99,3±1,3	0,010			
	фенолфта- леин	C ₂ H ₅ ОН	100,3± 1,6	0,020			
		0,1М НСl	99,6± 2, 3	0,023			
	бензойная кислота	C ₂ H ₅ ОН	99,4± 1,3	0,013			

Библиографический список

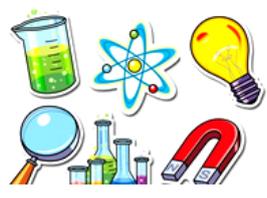
1. Машковский М.Д. Лекарственные средства. – 15 изд., перераб., испр. и доп. – М. : Новая Волна, 2005. – 1200 с.
2. Пиразидол. Фармакопейная статья 42-1436-08. – М., 2008. – 12 с.
3. Таблетки пиразидола 0,025 и 0,05 г. Фармакопейная статья 42-1850-08. – М., 2008. – 17 с.
4. Илларионова Е.А. Спектрофотометрическое определение пиразидола / Е.А. Илларионова, И.П. Сыроватский, Е.М. Артасюк // Журнал аналитической химии. – 2004. – Т. 59, № 6. – С. 628–630.
5. Илларионова Е.А. Спектрофотометрическое определение 7-[2-окси-3(N-метил-б-оксиэтиламино)-пропил]-теофиллина никотината с применением дихромата калия / Е.А. Илларионова, И.П. Сыроватский, Л.В. Абрамова // Изв. вузов. Сер. «Химия и хим. технология». – 2001. – Т. 44, вып. 4. – С. 7–10.
6. Илларионова Е.А. Новый вариант спектрофотометрического определения слабоокрашенных производных пиридина / Е.А. Илларионова, И.П. Сыроватский, Л.В. Абрамова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68, № 2. – С. 9–13.
7. Лазницкая А.М. Разработка методики количественного определения тофизопама / А.М. Лазницкая, Е.А. Илларионова, Н.В. Чмелевская // Вопросы естествознания. – 2014. – № 3 (4). – С. 19–22.
8. Лазницкая А.М. Спектрофотометрический анализ тофизопама / А.М. Лазницкая, Е.А. Илларионова, М.Г. Токарева // Сибирский медицинский журнал (Иркутск). – 2015. – Т. 132, № 4. – С. 25–27.
9. Основы аналитической химии / под ред. Ю.А. Золотова. – Кн. 1. – М. : Высш. шк., 1999. – 351 с.



НАУКИ О ЗЕМЛЕ



Математика
Физика
Астрономия
Фармацевтические науки
Науки о Земле



УДК 550.3

В.В. Агеев^{^1}

О СТОРОННИХ ТОКАХ В ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Аннотация: В большинстве работ, посвященных изучению полей вызванной поляризации (ВП) электрокинетической природы, естественных фильтрационных полей (ЕП) и сейсмоэлектрических (СЭ) полей, подробно рассмотрена физика процессов на микроуровне пор и движения заряженных ионов. А формулировка задачи на макроуровне часто формализована и не раскрывает физики явлений. Поэтому полезно на качественном уровне рассмотреть вопрос об источниках этих полей, их локализации.

Ключевые слова: сторонние токи, диффузионные потоки, электрокинетические процессы.

Об авторах:

^{^1} Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН.

V.V. Ageev

ABOUT EXTERNAL CURRENTS IN ELECTROKINETIC PROCESSES

Abstract: Physics of the processes on the micro level and the motion of charged ions are analyzed in the majority of works devoted to the study of field induced polarization (IP) electrokinetic nature, natural filtration fields (EP) and seismic (SE) fields. The definition of the problem at the macro level are often not formalized and does not reveal the physics of the phenomena. It is therefore useful to consider the sources of these fields, their localization.

Keywords: third-party currents, diffusion flow, electrokinetic processes.

Настоящее сообщение имеет целью систематизировать наши взгляды на электрокинетические процессы и с единых позиций рассмотреть источники электромагнитных полей, возникающих в пористых горных породах в таких методах, как ВП, ЕП, СЭ. В теории этих методов подробно изучен механизм образования соответствующих ЭМ полей, рассмотрены сторонние силы не ЭМ природы, участвующие при генерации полей. Физика этих процессов анализируется на микроуровне (на уровне пор). Изучены движение элементарных зарядов (ионов) и силы, действующие на них. Понятие зарядов необходимо на микроуровне для понимания физики. Однако при переходе на макроуровень и формулировке задачи мы можем обойтись без элементарных зарядов, рассматривая только токи, напряженности и поверхностные заряды на границах неоднородностей. Этому этапу уделим особое внимание, т. к. он хуже освещен в литературе.

Механизм образования поля ВП электрокинетической природы в теории этого метода рассматривается на модели ячейки поры переменного сечения или для гранулярной модели – сферического непроводящего зерна с поверхностным слоем зарядов Гельмгольца. Рассмотрены процессы, происходящие в ячейке при наложении электрического поля – нарушение концентрации ионов, возникновение диффузионных потоков ионов и образования зарядов в разных участках микроячейки. Эти вторичные заряды на микроуровне в элементарной ячейке создают электрическое поле ВП. А при переходе на макроуровень утверждается, что эффекты от всех элементарных ячеек суммируются. В подтверждение этого Д.А. Фридрихсберг [1] специальным

опытом с чередующимися ячейками, заполненными раствором KCl разной концентрации, разделенными разными мембранами, показал, что разность потенциалов суммируется. Такое понимание генерации поля ВП элементарными зарядами в ячейках плохо объясняет результаты многих конкретных задач. Например, если для гальванической установки на поверхности однородного поляризующегося полупространства используется генератор напряжения (генератор с очень малым внутренним сопротивлением), то при измерении электрического поля поляризация такой вмещающей среды не проявляется, хотя среда поляризуется. А в случае применения генератора тока (с большим внутренним сопротивлением) наблюдается поле ВП. А над локальной поляризуемой неоднородностью в обоих случаях наблюдается аномалия ВП. Просто при формулировке задачи на макроуровне мы должны оперировать токами и возникающими на границах неоднородностей макрорядами, создающими поле ВП. Диффузионные потоки заряженных ионов в отдельных ячейках, усредненные по объему среды, воспринимаются на макроуровне как ток. Это сторонний ток неэлектромагнитной природы, вызванный нарушением равновесия концентрации флюида в среде. Он создает магнитное поле. А источником электрического поля ВП могут быть только макроряды, образующиеся при пересечении сторонним током неоднородностей по электрическим свойствам на их границах. Для однородного полупространства такой границей будет поверхность питающих электродов. Сторонние токи поляризованной среды будут поддерживать заряд на электродах.

Сходная ситуация в методе ЕП с изучением электрокинетических фильтрационных потенциалов. Физика процесса и закономерности поля ЕП в физхимии изучались на пористых мембранах, через которые продавливалась жидкость. При этом на краях мембраны появляется разность потенциалов, которая не зависит от толщины мембраны, площади мембраны и количества протекаемой жидкости, а зависит от свойств мембраны, жидкости и скорости фильтрации (или перепада давления). При движении раствора через поры под действием внешнего давления из-за существования диффузной части ДЭС поток катионов превышает поток анионов. Разность потоков представляет собой электрический ток. Это сторонний ток не ЭМ природы. Он не создает электрического поля (т. к. электрическое поле создается макрорядами, а не током), но создает магнитное. На выходе из мембранной перегородки образуется свободный заряд, который порождает электрическое поле и встречный объемный ток I_v по всему объему капилляров. Возникающая на концах капилляров разность потенциалов и встречный ток будут возрастать до тех пор, пока не установится стационарное состояние с постоянным потенциалом течения и $I_s = I_v$ (суммарный ток станет равным 0 и, соответственно, магнитное поле тоже обнулится). То есть для лабораторного эксперимента по продавливанию жидкости через пористую мембрану источником измеряемого электрического поля фильтрации являются накапливаемые заряды (катионы) на выходе из мембраны. То есть сторонний ток течения приводит к появлению зарядов на поверхности мембраны, а уже заряды порождают измеряемое электрическое поле. Для стационарного состояния ($I_s = I_v$) потенциал течения описывается уравнением Гельмгольца – Смолуховского. Заметим, что просто течения жидкости через пористую среду под действием градиента давления недостаточно для того, чтобы появилось электрическое поле фильтрации. Должны где-то возникнуть макроряды – источники поля ЕП. Как показано у А.А. Кауфмана [2], такими местами являются неоднородности по электрическим и фильтрационным параметрам, которые пересекает сторонний ток течения и места нагнетания и разгрузки воды. Тогда понятна природа индикационных зон, рассмотренная В.В. Кормильцевым [3], в которых наблюдаются аномалии фильтрационных потенциалов над геоэлектрическими неоднородностями

при фильтрации флюида. На неоднородности возникает заряд – источник электрического поля.

Когда переходят к рассмотрению фильтрации воды в земле (макрозадача), то часто рассматривается локальная задача с заданным градиентом давления (или скоростью фильтрации) и локальными электрокинетическими параметрами среды. Создается иллюзия, что весь путь фильтрации порождает электрическое поле или наблюдаемое локальное электрическое поле характеризует фильтрационные свойства пород в области измерения. Например, часто наблюдаемый непрерывный рост потенциала при фильтрации по профилю вдоль реки трактуется как суммирование потенциалов, создаваемых на каждом элементарном участке. На самом деле электрическое поле в каждой точке определяется всей совокупностью распределенных сторонних токов течения и распределением электропроводности в разрезе. Если в разрезе есть электропроводящие участки в местах образования макрочарядов (например, фильтрующий слой подстилается глиной), то заряд будет разряжаться через этот проводник и фильтрационного поля ЕП не возникнет. Эта ситуация аналогична рассмотренной выше задаче ВП однородного полупространства и генератора напряжения. В обоих случаях сторонние токи есть, но заряды не могут накапливаться на поверхности неоднородности, т. к. разряжаются через проводники. И не возникает полей ВП или ЕП.

При рассмотрении теории сейсмoeлектрического метода последовательность происходящих в пористой флюидонасыщенной среде процессов следующая. Запаздывающее движение заряженной жидкости относительно твердого скелета при распространении сейсмического колебания представляет собой сторонний ток механической природы. Далее утверждается, что это распределение стороннего тока порождает электрическое поле СЭ природы. Для найденного распределения стороннего тока решается обычная электродинамическая задача. Формально это правильная формулировка и этого достаточно для решения задачи. Но полезно понимать, что на самом деле электрическое поле создается распределенными зарядами, которые возникают в данном случае даже в однородной среде без неоднородностей за счет того, что сторонний ток меняет свою величину и направление в разных точках сейсмической волны.

При строгой математической формулировке рассматриваемых задач, в которых возникают сторонние силы, нам достаточно определить распределение соответствующих сторонних токов в среде и для этого распределения решать обычную электродинамическую задачу по определению ЭМ полей. Однако приведенные качественные рассуждения о локализации реальных источников – макрочарядов полезны для лучшего понимания и объяснения возникающих эффектов.

Библиографический список

1. 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.
2. Кауфман А.А., Андерсон Б.И. Принципы методов наземной и скважинной электроразведки. – Тверь : АИС, 2013. – 488 с.
3. Кормильцев В.В., Ратушняк А.Н. Моделирование геофизических полей при помощи объемных векторных интегральных уравнений. – Екатеринбург : УрО РАН, 1999.



УДК 550.8

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

О СВОЕВРЕМЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ В ПРАКТИКУ КАРТИРОВОЧНЫХ И ПОИСКОВЫХ РАБОТ МЕТОДА ЧЭЗ

Аннотация. Электромагнитное (EM) зондирование в частотной области в последнее десятилетие приобретает все большую популярность. Это связано с высокой чувствительностью и разрешающей способностью метода, а также с его высокой помехозащищённостью. EM методы, использующие частотную область, можно четко разделить на две группы:

– малоглубинные методы электропрофилирования, применяющие высокие частоты EM поля. В этих методах преимущественно используются магнитные компоненты EM поля (Геоникс, Нимрат, Новосибирск);

– электромагнитные зондирования в широком диапазоне глубин, включающие в себя две группы методов: импедансные зондирования (CSAMT) и компонентные зондирования (ЧЭЗ), объединяющие в себе геометрический и индукционный способы зондирований.

Обе группы методов активно используют как магнитные, так и электрические компоненты EM поля, при этом CSAMT использует только дальнюю зону контролируемого источника, а ЧЭЗ – дальнюю, среднюю и ближнюю зоны этого источника, что дает ряд существенных преимуществ при интерпретации полевых данных. Высокая разрешающая способность может быть в полной мере реализована в настоящее время при инженерных изысканиях и поисках подземных вод с появлением на рынке широкодиапазонного (50 000 – 0,01 Гц) многофункционального аппаратно-программного комплекса.

Ключевые слова: Частотные электромагнитные зондирования с контролируемым источником, электроразведка, удельное электрическое сопротивление.

Об авторах:

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

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

I. Ingerov, T. Rudak, E. Ermolin

APPLICATION OF THE FREQUENCY DOMAIN ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS METHOD (FDEMS) FOR GEOLOGICAL MAPPING AND MINING EXPLORATION

Abstract. The electromagnetic (EM) methods in the frequency domain (FDEM) have become increasingly popular in the past decade due to their high resolution and sensitivity, as well as high immunity to EM noise. They could be separated in two groups:

– Shallow FDEM profiling techniques which use high frequency bands and mainly utilize only the magnetic components of the EM field (Geonics, Nimrat, Novosibirsk);

– Electromagnetic soundings in wide depths intervals, consisting of two sub methods: the impedance soundings (CSAMT); and the individual components EM soundings (FDEMS). The last sub method combines geometric and induction soundings techniques.

Both electromagnetic soundings sub methods actively use magnetic and electrical EM field components and, whereas in the CSAMT uses only the far zone of the control source is being used, the FDEMS engages all three control source zones: nearest, middle and far. Such feature provides a number of significant advantages during field data interpretation. At the present time, hardware capabilities of recently developed wideband (50 000 – 0.0001 Hz) multifunction EM data acquisition systems allow to take full advantage from the application of the high resolution FDEMS method for solving a variety geological engineering and groundwater exploration tasks.

Keywords: frequency domain electromagnetic soundings with control source, electroprospecting, apparent resistivity.

Методы исследований на переменном токе можно четко подразделить на две группы:

– малоглубинные методы электропрофилирования, применяющие высокие частоты ЕМ поля. В этих методах преимущественно используются магнитные компоненты ЕМ поля (Геоникс, Немфис, Новосибирск). В основном эти методы включают малоглубинные исследования с использованием преимущественно магнитных компонент поля в диапазоне 100 000 – 1000 Гц. [3];

– электромагнитные зондирования в широком диапазоне глубин, включающие в себя две группы методов: импедансные зондирования (CSAMT) и компонентные зондирования (ЧЭЗ), объединяющие в себе геометрический и индукционные способы зондирования.

CSAMT известен с 80-х годов прошлого столетия [7] как метод, позволяющий продолжить магнитотеллурические зондирования в область высоких частот. Преимущественно метод подразумевает использование электрического питающего диполя (АБ) и измерения в экваториальной области дальней зоны параллельной электрическому диполю электрической компоненты E_{xy} и ортогональной этому диполю магнитной горизонтальной компоненты H_{yz} . Кажущееся сопротивление ($\rho_{\omega xy}$) в этом случае рассчитывается как в методе МТЗ путем нормирования электрического поля на ортогональное ему магнитное.

Метод частотных зондирования (ЧЭЗ-FDEMS) с контролируемым источником, основанный на раздельном использовании 1–5-ти компонент ЕМ поля [6], был разработан в 50-годы прошлого столетия и активно применялся в бывшем СССР в 50–90-х годах того столетия. Тогда были созданы низкочастотный (100 – 0,01 Гц), среднечастотный (2000 – 1 Гц) и высокочастотный (10 000 – 70 Гц) комплекты аппаратуры, а также были разработаны методы интерпретации полевых данных [4]. Параллельно был создан сверхчастотный (1 500 000 – 1000 Гц) комплекс для инженерных изысканий в строительстве. Незрелость компьютерной базы стимулировала в это время развитие методов интерпретации способом характерных точек. Наличие на кривых ЧЭЗ элементов, тесно связанных с соотношением разноса зондирования к глубине залегания высокоомной опорной границы, обеспечило методу высокую точность картирования границ высокоомных опорных горизонтов. Это свойство метода в гораздо большей степени может быть реализовано в настоящее время на базе современной высокоточной многофункциональной широкодиапазонной аппаратуры.

1. Методика полевых работ в методе ЧЭЗ

Как правило, при полевых работах используется заземленный питающий электрический диполь, а в экваториальной области на разносах, в 2–10 раз превышающих глубину исследований, измеряются параллельная диполю горизонтальная электрическая компонента (E_{xy}), также производная по частоте вертикальной магнитной компоненты ($\partial B_{zy}/\partial \omega$). Эти две компоненты ЕМ поля являются наиболее чувствительными к изменениям параметров геоэлектрического разреза. С точки зрения производительности, нередко производятся измерения только осевой горизонтальной электрической компоненты (E_{xx}). В любом случае в пунктах измерений производится регистрация амплитуды сигнала и дифференциального фазового параметра, представляющего собой нормированный на частоту сдвиг фаз между 1-й и 3-й гармониками сигнала ($\Delta \varphi$). Физический смысл этого параметра описывается (1) и представляет собой сумму фазы сигнала минус нормированная на частоту его производная по частоте (5):

$$(\Delta \varphi) = \varphi - \omega \times \partial \varphi / \partial \omega \quad (1); \quad P = k \times \Delta U / I. \quad (2)$$

Использование дифференциального фазового параметра позволяет не только получить более разрешенные (дифференцированные) по частоте фазовые кривые, свободные от статистического эффекта. Кажущееся сопротивление (R) в методе ЧЭЗ вычисляется путём деления нормированного на геометрический коэффициент (k) сигнала в точке наблюдений (ΔU) на ток в контролируемом источнике (I) по формуле (2). Построенные на билогарифмическом бланке кривые кажущегося сопротивления и изображенные на полулогарифмических бланках кривые дифференциального фазового параметра являются объектом интерпретации.

2. Особенности кривых ЧЭЗ над высокоомным опорным горизонтом

На рис. 1 изображены двухслойные амплитудные (ρ) и фазовые ($\Delta\phi$) кривые для электрической и магнитной компонент ЕМ поля экваториальной установки. Соотношение разнота зондирования к глубине залегания опорного горизонта равно 4. Для разреза с высокоомным основанием на амплитудных кривых наблюдаются горизонтальная асимптота, соответствующая сопротивлению первого слоя, за которой следует пологий максимум, ниспадающая ветвь, четкий минимум, крутая восходящая ветвь и максимум. При этом для магнитной компоненты максимум очень четкий, за которым следует ниспадающая ветвь с выходом на асимптоту ближней зоны, падающей под углом 45° .

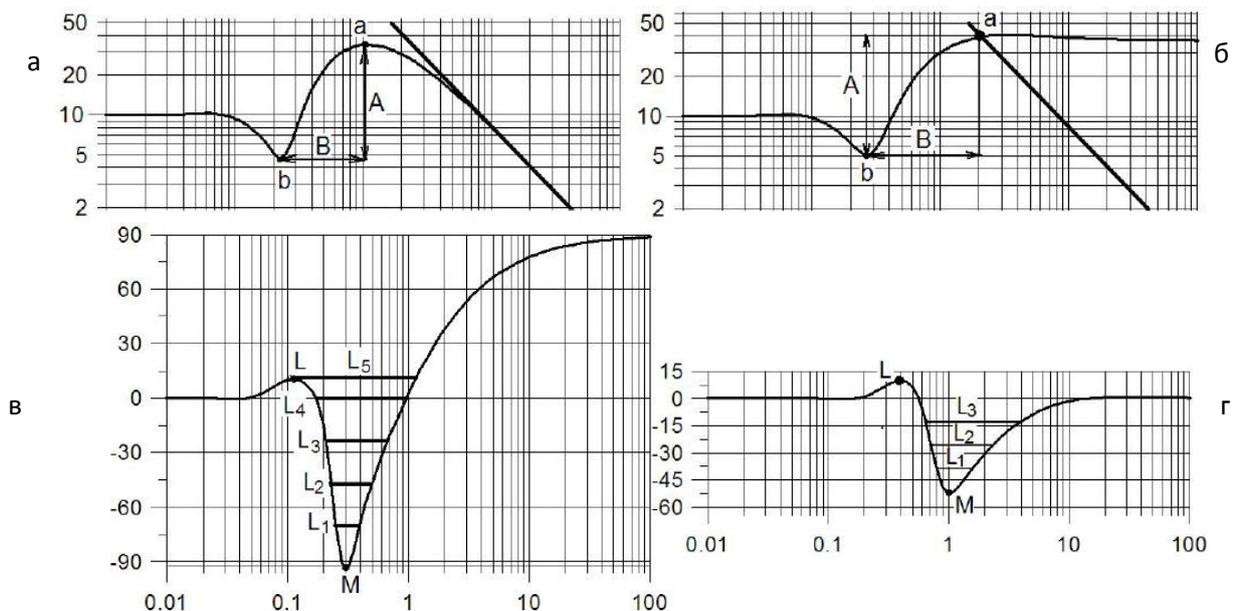


Рис. 1. Амплитудные и фазовые кривые ЧЭЗ вертикальной магнитной компоненты ($\partial B/\partial\omega$) (а, в) и горизонтальной электрической компоненты (E_x) (б, г) над двухслойным разрезом с высокоомным вторичным горизонтом

Положение асимптоты ближней зоны описывается уравнением (3). Ее положение определяется только разном зондирования (R) и не зависит от характера геоэлектрического разреза.

$$P\omega = 1,3 \times R \times f; \quad (3)$$

$$S = R/\rho_{as}; \quad (4)$$

$$C = \rho_{min}/R2 \times f_{min} \quad (5)$$

В отличие от магнитной компоненты, на электрической компоненте наблюдается очень пологий максимум и далее очень медленный выход на горизонтальную асимптоту.

Ордината этой правой асимптоты однозначно определяет суммарную продольную проводимость (S) низкоомных пород, залегающих над высокоомным опорным горизонтом (4).

На практике удобнее использовать вместо рас ординату точки пересечения амплитудной кривой для электрической компоненты с асимптотой ближней зоны ра (рис. 1). Информация о величине Н выражена в соотношении разности зондирования (R) к глубине залегания опорного горизонта (Н). С последним параметром тесно связаны параметры А, Б, С на амплитудных кривых. Параметры А и Б показаны на рис. 1, а параметр С определяется по формуле (5). Для фазовых кривых с отмеченным параметром тесно связаны ордината минимума $\Delta\phi_{\min}$, а также ширина минимума на некоторых расстояниях от его экстремальной точки (рис. 1).

3. Практические примеры применения – Томаковская площадь Украинского щита

Полевые работы выполнены в 1978–1979 годах [1]. Применялась аппаратура НЧЭЗ–73, частотный диапазон 10 000–70 Гц. Применялись разности зондирований 100 и 200 м. Средняя точность определения ρ_{ω} составила 4,7 %. Задачей зондирования было картирование поверхности неразрушенного кристаллического фундамента, покрытого мощной каолиновой корой выветривания и четвертичными осадочными породами. Суммарная мощность низкоомных отложений колебалась от 10 до 100 м. Тип разреза низкоомных отложений существенно изменялся по площади от двухслойного до четырехслойного КНА. Типичные амплитудные кривые ЧЭЗ для разнесов 100 и 200 м приведены на рис. 2. Применение методов экспресс-интерпретации с использованием двухслойных зависимостей для параметров А, В, С составило порядка 10 %. Использование статистического способа интерпретации с выборкой по 43 скважинам позволило снизить среднюю погрешность определения глубины залегания кристаллических пород до 8 %. Разделение обучающей выборки на три класса: двухслойные, трехслойные типа Н, четырехслойные типа На позволило снизить среднюю ошибку до 6 %. Было установлено, что снижению средней ошибки определения Н способствует применение двухразносных зондирований, а также измерение двух компонент электромагнитного поля (горизонтальной электрической и вертикальной магнитной).

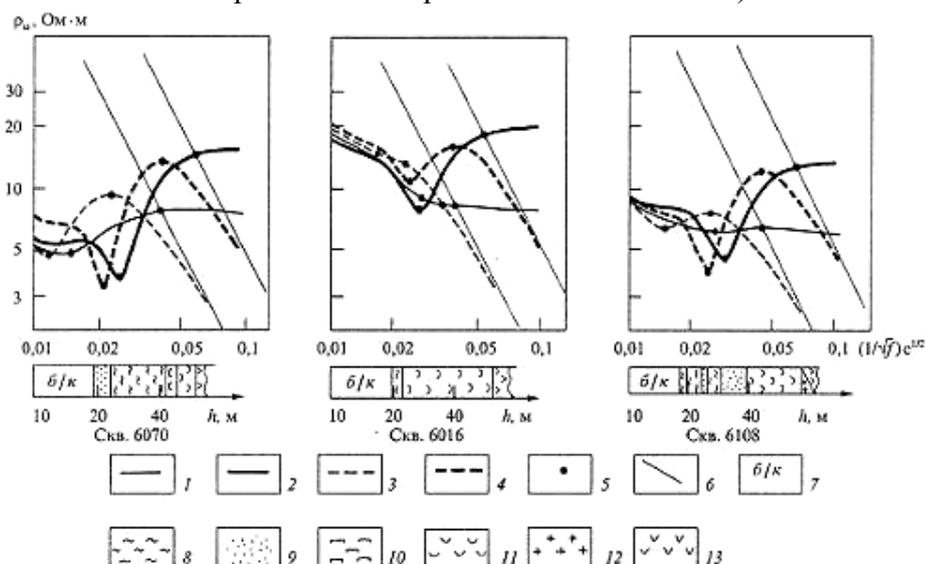


Рис. 2. Типичные кривые ЧЭЗ на Томаковской площади.

Слева направо: А-скважина #6170, тип А; В-скважина #6016, тип Н, С-скважина #6108, тип НА;

1. E_x , $R = 100$ м; 2. E_x , $R = 200$ м, 3. $\partial B_z / \partial \omega$, $R = 100$ м, 4. $\partial B_z / \partial \omega$, $R = 200$ м; своеобразные точки на кривых удельного сопротивления; асимптота ближней зоны; 7 – интервал бурения без керна; 8 – сланец, 9 – песок; 10 – каолин; 11 – кора выветривания (в основном каолин); 12 – граниты; 13 – амфиболиты

4. Практические примеры применения – Днепровская площадь Украинского щита

На Днепровском участке работы методом ЧЭЗ были выполнены аппаратурой ЭВА-203 и НЧЭЗ-73 [2]. Разносы зондирований составляли 200, 300, 400 метров. Глубина залегания кристаллического фундамента колебалась в пределах 60–300 м. Аппаратура ЭВА наряду с амплитудными измерениями позволяла осуществлять дифференциальные фазовые измерения. Примеры амплитудных и фазовых кривых для 3-х разносов (300–400–600 м) приведены на рис. 3.

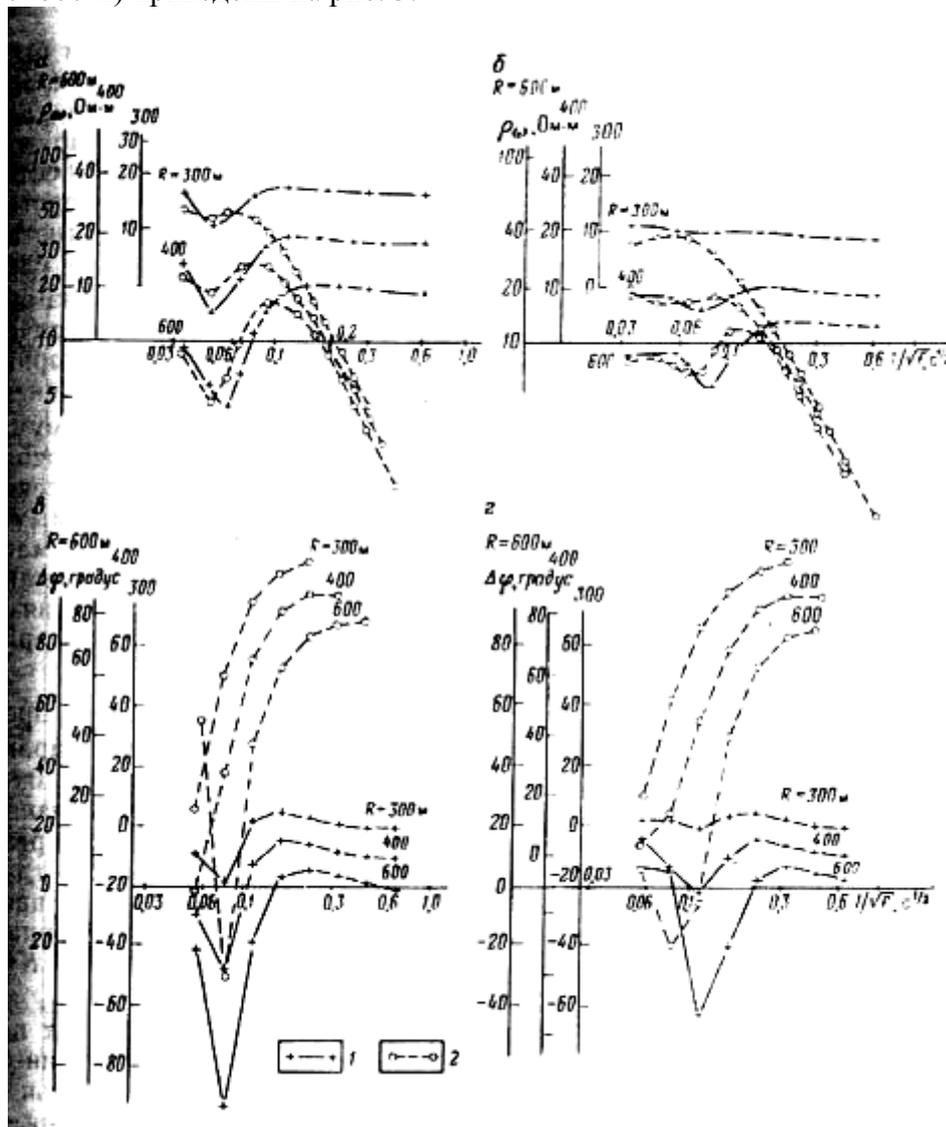


Рис. 3. ЧЭЗ кривые ρ_{ω} и $\Delta\varphi$, полученные по результатам измерений электрического (1) и магнитного (2) полей с аппаратурой ЭВА-203 при разных глубинах залегания кристаллического фундамента (а, в – 130 м; б, г – 219 м)

Дифференциальные фазовые кривые оказались очень благоприятным объектом для интерпретации материалов ЧЭЗ. Сочетание амплитудных и фазовых кривых для двух компонент поля по трем разносам позволило достичь точности картирования поверхности фундамента в 2 %.

Выводы

Метод ЧЭЗ обладает повышенной точностью картирования высокоомных границ. Повышению точности картирования границ способствует:

- выполнение амплитудных и фазовых измерений;
- измерение двух компонент электромагнитного поля;
- применения нескольких разносов зондирования.

Очевидно, что при применении современной высокоточной многофункциональной аппаратуры точность картирования границ может быть значительно улучшена.

Библиографический список

1. *Ingerov A.I., Soldatenko, V.P.* About accuracy of the depth of high resistive reference horizon estimation by methods of frequency electromagnetic sounding // The reports of National Academy of Science of Ukraine, 1998, 12. – Pp. 123–128
2. *Gorunov A.S., Ingerov A.I., Kulikov A.V.* Equipment EVA-203 application for Frequency Electromagnetic sounding // Application Geophysics, 1987. – 117. – Pp. 62–69.
3. *Manstein A.K., Panin G.L., Tikunov Yu, S.* A device for shallow frequency-domain electromagnetic induction sounding // Russian Geology and Geophysics, 2008, 49. – Pp. 430–436.
4. *Ivanov A.P.* Frequency Electromagnetic Sounding // Academy of Science of USSR, Institute Physics of the Earth, 1983. 227 pgs.
5. *Kulikov A.V., Shemyakin E.A.* Electroprospecting by Phase Method of Induced Polarization // Moscow, “Nedra”, 1978. 248 pgs.
6. *Vanyan L.L.* The bases of electromagnetic soundings // Moscow, “Nedra”, 1965, 105 pgs.
7. *Zonge, K.L., Hughes, L.J.* Controlled source audiofrequency Magnetotellurics. In Nabighian, M.N. (Ed.) // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Volume 2, Applications: Parts A and Part B, Society of Exploration Geophysicists Investigations in Geophysics 3, 1991. – Pp. 713–809. – Doi: 10.1190/1.9781560802686.ch9.



УДК 553.22+553.98

Г.М. Петруняк

УГЛЕВОДОРОДНО-МИНЕРАЛЬНЫЙ МЕТАСОМАТОЗ УКРАИНСКИХ КАРПАТ

Аннотация. При исследовании углеводородно-минерального метасоматоза в Карпатах обнаружено стадийное минералообразование с последовательным фракционированием углеводородов от тяжелых до легких. Поведение углеводородов при метасоматозе определяется уникальностью их физико-химических свойств и упирается в важность окончательного решения проблемы генезиса нефти.

Ключевые слова: Углеводородно-минеральный метасоматоз, Карпаты, минералообразование, фракционирование углеводородов.

Об авторах:

Львовский национальный университет имени Ивана Франко, геологический факультет, Львов, Украина; e-mail: galina_kosiv@mail.ru.

G.M. Petrunyak

THE HYDROCARBON METASOMATISM OF UKRAINIAN CARPATHIANS

Abstract. *During the studying of the carbon-mineralized metasomatic processes, the formation of the stage-mineralization with a consecutive fractionation of hydrocarbons from heavy to light has been found. A characteristic of hydrocarbons during metasomatism is determined by their unique physical and chemical properties, and rests against the importance of the final solution to the problem of the oil's genesis.*

Keywords: *carbon-mineralized metasomatism, Carpathians, mineralization, hydrocarbon fractionation.*

Изучение углеводородно-минерального метасоматоза в Карпатской нефтегазоносной провинции является неременной предпосылкой более глубокого понимания геолого-геохимических условий, способствующих формированию залежей углеводородов.

Исходя из сложнейших геогенерационных и тектонических взаимоотношений в условиях субдукции [11, 12, 15], установлены общие стратиграфические и структурные закономерности распределения углеводородов. В рудных минеральных ассоциациях Закарпатского Внутреннего прогиба присутствуют карпатит, кертисит, мальта. Внешний Предкарпатский прогиб характеризуется месторождениями озокерита (Борислав, Старуня, Дзвиняч, Трускавец). Происходящие процессы современного минерагенеза и установленный парагенезис минералов по сохранившимся отвалам горных выработок [11] требуют дальнейших исследований.

Сульфатно-карбонатный минеральный метасоматоз в связи с инфильтрацией глубинных флюидов сквозь толщу осадочных пород в Карпатской нефтегазоносной провинции впервые описан М.Б. Рипун [13]. Дальнейшие исследования в основном сосредотачивались на всестороннем изучении геохимии микроэлементов битуминозных сланцев и золы нефти [3] на глобальном уровне. В многочисленных научных работах геохимия углеводородов рассматривается в корреляции с геологическим строением при изучении коллекторско-миграционных свойств нефти, формальным соотношением ее составляющих и спорных положений генезиса.

Установление деформационно-метасоматических преобразований нефтяных залежей [6] обосновывает целесообразность изучения углеводородного метасоматоза во всех его формах проявления в нефтегазоносных провинциях.

В Карпатской нефтегазоносной провинции установлено существенное влияние присутствия в минералообразующих флюидах углеводородов на морфологию минеральных индивидов и скоплений. В них наблюдается последовательное фракционирование от тяжелых углеводородов нафтенового ряда к легким. Объем выделенной нефти при растворении карбонатов в породе свидетельствует о нахождении ее под значительным давлением. Захваченная во время роста кальцита и кварца нефть не вызывает изменений параметров элементарных ячеек и, следовательно, должна рассматриваться как примесь [9].

В зоне надвига Оровской скибы (с. Дора) обнаружена зона брекчирования, сцементированная кальцитом-«медовиком», содержащим нефть. По вертикали кальцит сменяется скаленоэдрами молочно-белого кальцита, а выше – уплощенными по L_3 кристаллическими ромбоэдрами.

Исследование коломорфных пирит-марказитовых и брунцитовых образований, лучисто-скорлуповатого кальцита, кристаллов доломита, кальцита, самородной серы, кварца, галита указывает на исключительное влияние углеводородов на морфологию минеральных агрегатов и габитус индивидуумов.

Таким образом, геохимию углеводородного метасоматоза следует рассматривать исходя из уникальности геохимических свойств углеводородов, специфики их миграции (диффузной, поровой, пленочной и канальной – на кристаллохимическом уровне).

В зонах тектонических нарушений в Карпатах наблюдается развитие карбонатных прожилков со спорадическим обогащением их легкими углеводородами. В пришлифованных штуфах пород, отобранных на участках интенсивных поверхностных выходов нефти, наблюдается их стадийное фракционирование от тяжелых до легких.

В последнее время много внимания уделяется изучению кварца типа мармарошские «диаманты» в тесной генетической корреляции с углеводородами внутренних структурно-фациальных зон Карпат. Однако с момента современного описания морфологии включений в «диамантах» [21] и диагностики нефти в их вакуолях [10] принципиально важной новизны в этом направлении пока не достигнуто, тем более что изучаемые объекты находятся в зоне гипергенеза.

Поэтому особое значение приобретают недавние исследования геологического строения и углеводородно-минеральных образований при проходке Бескидского тоннеля в Украинских Карпатах, который сегодня является единым однорельсовым участком 5-го Паневропейского коридора, который проходит по территории Украины, Словакии, Венгрии и Италии.

В структурном отношении, Бескидский тоннель проходит сквозь Силезкую структурно-фациальную зону, контактирующую с юга с Магурской, а с севера – со Скибовой зонами.

Силезкая зона широкой полосой простирается от Моравско-Силезских Карпат через территорию Польши и заходит в Украинские Карпаты, представляя собой крупный покров с амплитудой горизонтального смещения около 25–30 км.

В Силезкой зоне Западных Карпат широко распространены меловые отложения, которые в районе р. Била, на фоне общего погружения, постепенно скрываются под породы палеогена. Полоса меловых поднятий замещается областью развития кросненских отложений, которую польские геологи именуют Ясельским синклиноморфом. На участке этого синклиноморфа в Украинских Карпатах, в верховьях рек Днестра и Стрия, расположен район развития кросненских слоев с килевидными антиклинальными поднятиями, сложенными в ядрах породами менилитовой свиты олигоцена.

Структуры обычно имеют крутые крылья ($65\text{--}85^\circ$) и с северо-востока усложнены надвигами (амплитуда 1–3 км), что придает территории чешуйчатое строение. Участок тоннеля Бескид расположен между этими структурами и Голятинским поднятием с выходами на поверхность меловых отложений в чрезвычайно сложных тектонических взаимоотношениях с окружающими породами палеогена.

При проходке тоннеля вскрывается флишеидная толща пород кросненской свиты с ритмично выдержанным чередованием темно-серых до черных аргиллитов (10–20 см) и серых кварцевых песчаников (40–60 см) с серицитом.

В ближайшем к порталу искусственном обнажении прослежена первая кварц-карбонатная минерализация (рис. 1).

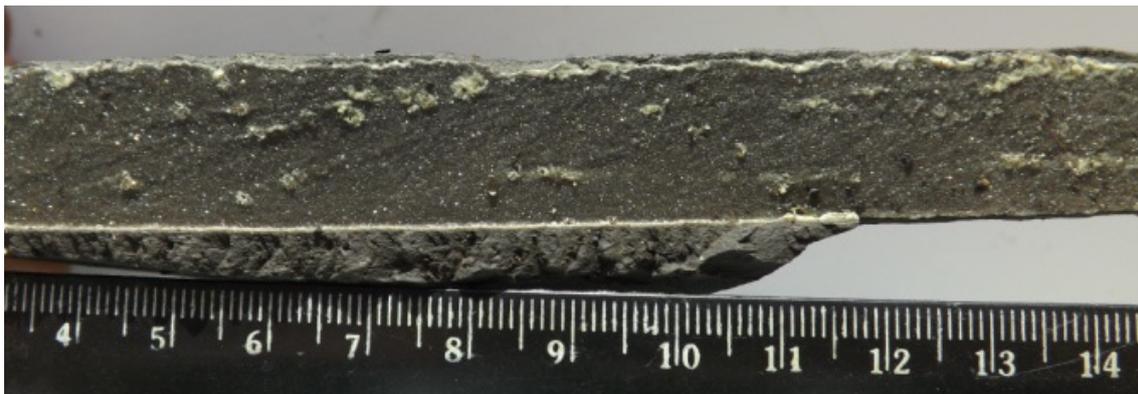


Рис. 1. Алевролит темно-серый, на поверхности скола с единичными кристаллами кварца (мармарошских «диамантов») на тонкокристаллическом кальцитовом субстрате. Образец отобран в месте стекания легкой флюоресцирующей нефти светло-зеленого цвета

Аргиллиты от темно-серого до черного цвета, тонкослоистые, разбиты системой перпендикулярных к поверхностям наслонения трещин, заполненных углеводородно-кальцит-кварцевой минерализацией (рис. 2).

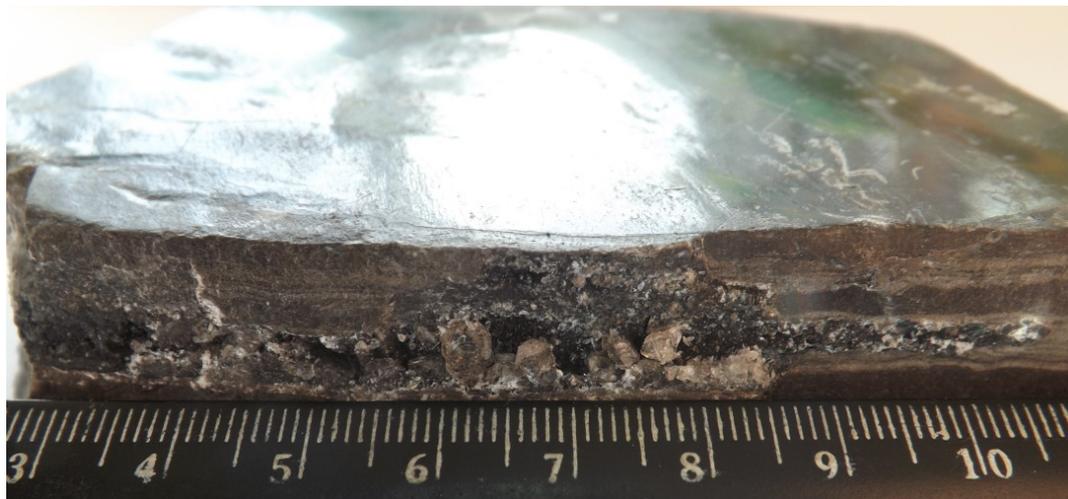


Рис. 2. Аргиллит с блестящей поверхностью скольжения, перекрывший поступление нефти и минералообразующих флюидов в тектоническую трещину

Кварц – мармарошский «диамант» в зияющих трещинах образует самостоятельные индивиды скелетного роста, прикрепленные к субстрату исключительно призмой. В кристаллах наблюдаются вакуоли, заполненные жидкой фазой нефти и водными флюидами. Нередко углеводороды образуют скопления в кварце в виде «комет» роста, а на стыке ребер – дендритообразных выделений твердых углеводородов.

Мармарошский «диамант» кристаллохимически является обыкновенным кварцем с высокой прозрачностью и блеском, отдаленно напоминающим цветовую игру бриллиантов. В изготовленных пластинках толщиной 0,1 мм при скрещенных николях четко обнаруживают оптическую неоднородность интерференционной окраски по зонам роста, которые при очередном нарастании незначительно отклонялись в пространстве от главной кристаллографической оси L_6 .

Мармарошские «диаманты» наблюдаются в виде отдельных кристаллов, величиной до одного сантиметра. В кальцитовых прожилках образуют скопления (рис. 3).

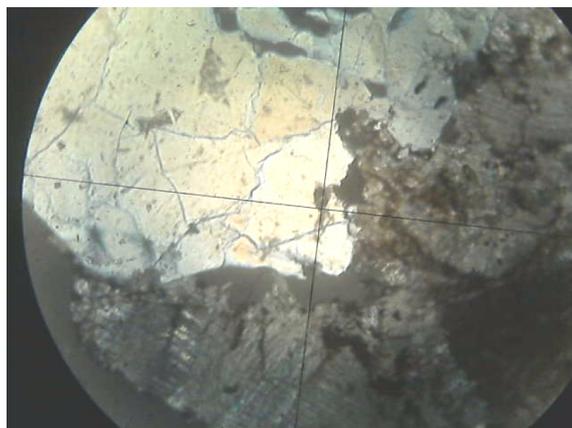


Рис. 3. Мармарошские «диаманты» (белое) в кальцитовом прожилке под микроскопом (николи +, увел. в 18 раз)

Наблюдениями за структурным положением мармарошских «диамантов» в строящемся туннеле Бескид-Скотарское установлено начальное поступление флюидов с нефтью по вертикальным трещинам к напластованию с образованием кальцита и кварца. В результате тектонической деятельности прожилки ступенчато разобщены плоскостями смещения с зеркалами скольжения.

Наличие кварца типа мармарошские «диаманты» установлено также на исчерпанном месторождении нефти Слобода Рунгурская в Предкарпатском прогибе.

Ареалы развития кварца типа мармарошские «диаманты» обычно расцениваются главным признаком нефтеносности всего альпийского сооружения Карпат. Однако исследованиями констатируются факты присутствия нефти в вакуолях гипсов Прикарпатья, свободной нефти в метасоматически преобразованных гипсах в сероносные известняки Роздольского месторождения серы, наличие углеводородов в белемнитах Толтр Волыно-Подольской плиты Русской платформы и даже в золото-ураноносных конгломератах Витватерсранда [18].

Стратиграфическая приуроченность залежей нефти месторождений Борислава и Долины в основном связана с горизонтом «бориславского песчаника» (до 40 м).

Битуминозные сланцы менилитовой толщи олигоцена легко смачиваются поверхностными водами и не несут признаков нефти. В самом горизонте не обнаруживается нефть, но подстилающая ее верхняя пачка быстрицкой свиты содержит прослойки водоотталкивающих некарбонатных аргиллитоподобных глин, морфологически напоминающие мергели, в достаточной степени насыщенные нефтью. Если продуктивность горизонта «бориславского песчаника» четко проявляется на месторождениях Борислава и Долины, то в большинстве обнажений нефть в нем устанавливается только на контакте подошвы пласта песчаника (1–5 м) светлосерого, глауконит-кварцевого, горизонтально- и косослоистого, со следами конседиментационных перемыслов, с вертикальными и горизонтальными каналами от следов жизнедеятельности илоедов.

Подковообразные следы крепления губок на кровле песчаников, обилие микрофауны в пестроцветных горизонтах стратиграфического разреза и другие литолого-фациальные показатели ставят под вопрос предположение о значительных глубинах флишевого трога Карпат.

По латерали в пласте песчаника наблюдаются «болидообразные» участки окварцевания без изменения первичных текстурных признаков породы. Асимметрия окварцованных тел связана с направленностью элизионного гидродинамического режима, когда ионы кальция и углеводороды определяли геохимическую подвижность $[\text{SiO}_4]^{+4}$ и кристаллизацию кварца. На поверхностях скола породы часто обнаруживается дендровидное внедрение уже застывшей нефти.

Минералого-литологическая характеристика «бориславского» песчаника в научных работах представлена исчерпывающе. В основании горизонта «бориславского» слоя залегает пласт песчаника (1–2 м) со следами внутриформационного размыва, в котором обнаружены хлор-апатит, коллофан в виде сгусткового и базального цемента, а также примазки озокерита, тяготеющие к поверхности подошвы пласта и ходам илюдов.

В разрезе менилитовой свиты олигоцена и горизонте «бориславского песчаника» к различным стратиграфическим уровням приурочены так называемые сидеритовые стяжения, ставшие предметом изучения польских геологов [19, 20]. Впоследствии они описаны как железистые доломиты в виде линзообразных стяжений и прерывистых пластовых образованиях непостоянной размерности от нескольких десятков сантиметров до десятков метров, залегающих по наслоению пород. Вмещающие их черные битуминозные сланцы на контакте со стяжениями сжаты и собраны в микроскладки. До поступления в бассейн седиментации стяжения существовали как твердые тела [8]. По формационным признакам их следует относить к олистостромам, важность целевого изучения которых состоит в значительной насыщенности их углеводородами. Растворение в кислотах (рис.4) породы и карбонатных минералов сопровождается сильным запахом нефти.

Кроме того, карбонатные стяжения следует рассматривать как одну из форм поступления породы с нефтью в эоцен-олигоценую толщу современных Карпат, что является подтверждением предпосылки Н.Р. Ладыженского [7] о глубинном поступлении нефти за счет разрушения нефтяных месторождений герцинид и каледонид Пракарпат.



Рис. 4. Образец разделения углеводородов по фракциям после растворения в соляной кислоте карбонатной составляющей стяжений

Олистостромные карбонатные стяжения. Форма, размер, стратиграфическое положение и соотношение с вмещающими породами в общем являются основными признаками их развития по стратиграфической вертикали и латерали. Эти породы весьма твердые, упругие, с трудом поддаются раскалыванию и лишь при разрушении их во время катастрофических наводнений и работ по укреплению русел рек оказываются в расколотом состоянии, обнажая сущность своего внутреннего строения.



Рис. 5а. Выступ в тальвеге р. Лючка карбонатного стяжения насыщенного углеводородами

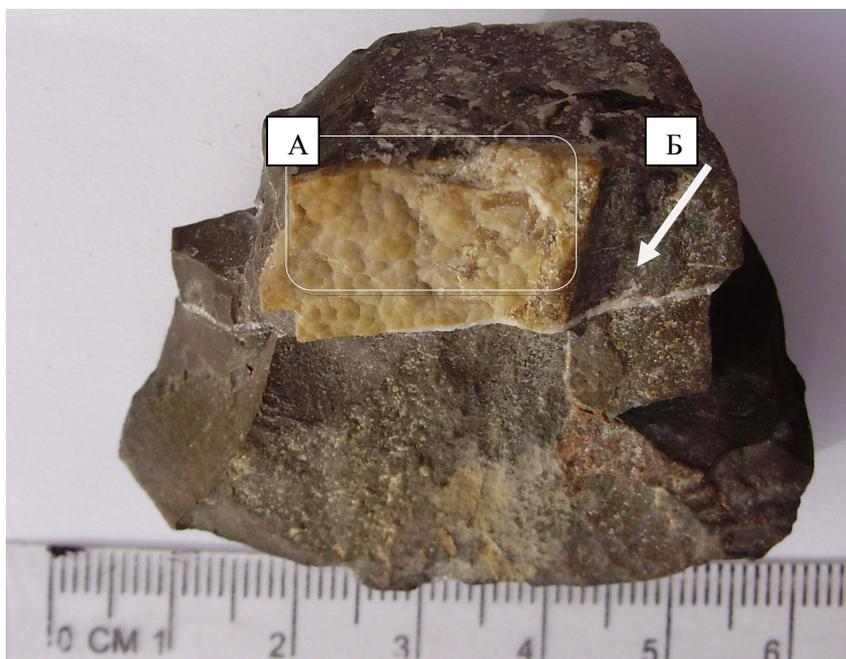


Рис. 5б. Скорлуповатое образование коричневатого кальцита обогащенного нефтью (А) во внутренней части карбонатного стяжения. На рисунке прослеживается секущий прожилок эпигенетического кальцита (Б), не заимствующий углеводородов из стяжения

Поверхность стяжений (рис. 5а) гладкая, в отдельных случаях в условиях динамического и коррозионного воздействия среды бассейна седиментации проявляется микрослоистость в связи с различиями в цементации кластического материала алевритовой фракции угловатых зерен кварца и реже глауконита.

Цветовая окраска – от кремового до бурого и черного цвета в зависимости от качественного, а также количественного состава углеводородов. В отдельных стяжениях свободное пространство минерализованных пустот заполнено нефтью (курорт Шешоры). Многочисленные трещины и пустоты никогда не проникают к наружной поверхности и выстланы последовательно баритом, сидеритом, кальцитом, доломитом и кварцем. Минералы диагностированы в шлифах и по данным рентгено-фазового анализа.

Барит в виде редких отдельных пластинок со спайностью приурочен к минерализованному субстрату, в проходящем свете буроватого цвета и близок к разновидности барита, насыщенного битумами.

Сидерит тонкозернистый, обычно приурочен к подошве стяжений, по которой в участках дробления образуются железистые охры в зоне гипергенеза.

Кальцит находится в тесном сростании более позднего доломита. У субстрата кальцит образует скорлуповатые лучистые агрегаты (рис.5 б) бурой окраски степень которой зависит от количества захваченных углеводородов во время роста. В отдельных участках стяжений ромбоэдры кальцита с зональностью, подчеркнутой периодическим захватом углеводородов. В свободном пространстве кристаллы молочно-белого кальцита кривогранны.

Доломит заполняет трещины в кальцитовых скоплениях. В отдельных случаях тонкокристаллический доломит покрывает поверхности внутри породы, среди которых выделяются крупные (до 2 см) скаленоэдрические кристаллы кальцита более позднего генезиса.

Рентгеноструктурными анализами подтверждено тесное сростание кальцита и доломита. После вытравливания кальцита в 6 % HCl на дифрактограммах базальные отражения принадлежат исключительно доломиту.

Рассекающие вмещающую толщу прожилки эпигенетического кальцита не заимствуют углеводородов карбонатных стяжений.

Кварц внутри стяжений образовался в последнюю стадию минерагенеза. В процессе нарастания наблюдается селективный отбор их с довольно совершенной огранкой в пустотах (рис. 6а) на тончайшем халцедоновом субстрате. Кварц из карбонатных стяжений с многочисленными первичными включениями по зонам роста и дендровидными выделениями твердых черных битумов в участках ребер роста. Включения в кварце однофазовые, жидкие, углеводородные, реже минералообразующих флюидов.

В рассматриваемых случаях Карпат стадийное фракционирование углеводородов в процессе эволюции минерагенеза в стяжениях является литифицированным (рис. 6б) свидетельством геохимической обстановки *in situ* и требует определения качественного и количественного состава углеводородов и кинетики изотопов.

Изучение природы внутренних деформаций с образованием пустот и трещин в стяжениях, которые в Карпатах никогда не вырываются наружу, имеет важное значение в исследовании нефтегазоносных провинций. К примеру, в кембрийских галогенно-карбонатных и карбонатных отложениях часто встречаются пластовые брекчии, сцементированные мелкокристаллическим карбонатным материалом, которые по простирацию переходят в ненарушенные карбонатные породы. Образование их обычно связывают с сейсмическими явлениями. Е.А. Басков [1] объясняет их разрядкой гидродинамических напряжений.



Рис. 6а. Участок окварцевания в карбонатных стяжениях с нефтяными битумами. Уменьш. в 8 раз (р. Прут, с. Делятин)

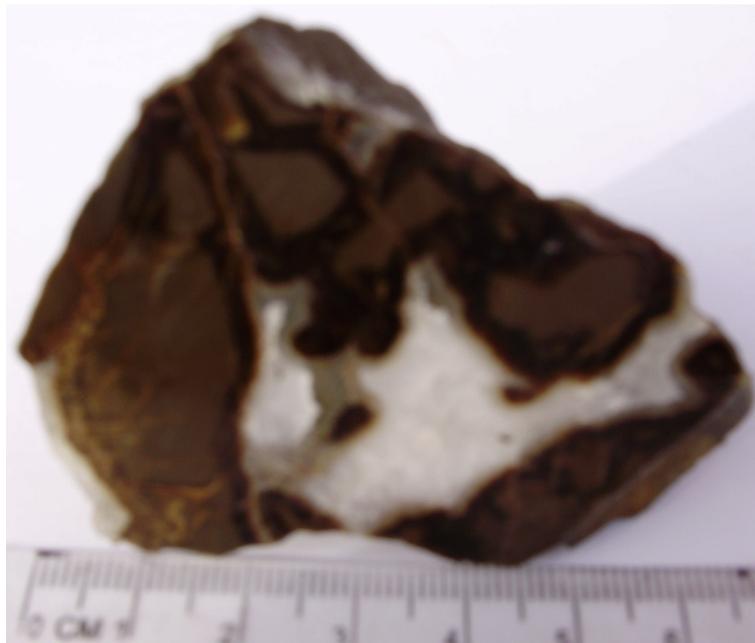


Рис. 6б. Пример морфологических особенностей окварцевания пустот в стяжениях и фракционирования углеводородов, которое устанавливается по степени теневой окраски при насветке в УФ спектре (р. Прут, с. Делятин)

Нефть современного речного аллювия обнаружена в боковой косе левого берега реки Быстрица Надворнянская, значительно насыщающая гравийно-галечные отложения (около 1 км), образовавшаяся из-за условия загрязнения главной речной артерии сточными водами нефтяных месторождений Быткова и Рыпне во времена интенсивной эксплуатации.

Известно, что разлившаяся нефть стремится к береговой линии водоема или в зонах шельфа Мирового океана. Оседание ее на дно бассейна наблюдалось после катастрофы 20 апреля 2010 г. в Мексиканском заливе. В том же году автором был проведен ряд опытов в стеклянных сосудах по осаждению маслянистых фракций с поверхности водной среды. Для осаждения применялся сухой порошок монтмориллонита, песок кварца и глауконита. На протяжении пяти лет использованные нефтепродукты из осадка не вырываются на поверхность. Осажденные углеводороды монтмориллонитом полностью обесцвечены.

Дальнейшие исследования процессов метасоматоза представляются многообразием естественной и спровоцированной миграции нефти, условий ее осаждения в современных осадках, фракционировании и миграции ее в современных геологических структурах.

Традиционно перспективу нефтегазоносных провинций оценивают с позиций неорганического или органического генезиса нефти. В первом варианте допускается ее мантийное происхождение. Если рассматривать этот процесс в телесном углу, то удельная площадь генерации убывает в квадратичной зависимости к центру Земли. Простота возможных химических реакций образования производных углерода скорее имеет гипотетический смысл [3]. Не исключена возможность ее образования в астрономическую фазу [14], длительность которой между развитием живого вещества [2] значительно расширяется в связи с обнаруженными на Земле породами возрастом в 7–10 млрд лет [16].

Тайна подземной жизни нефти, ее генезиса [5], как и эффект Окло [17], до конца не выяснены. Следовательно, в геологической науке увеличивается ресурс научного поиска, исходящего из философского принципа – познание глубин природы бесконечно.

Библиографический список

1. Басков Е.А. Палеогидрогеологический анализ при металлогенических исследованиях / Е.А. Басков. – Л. : Недра, 1976. – 199 с.
2. Виноградов В.И. Геохимия живого вещества / В.И. Виноградов. – Л. : Изд АН СССР, 1932. – 67 с.
3. Вульчин Є.І. Високомінералізовані вуглісті утворення і графіти України // Є.І. Вульчин, М.Д. Братусь, О.Є. Іванців, З.В. Шабо. – К. : Наукова думка, 1967. – С. 140.
4. Вульчин Є.І. Геохімія мікроелементів у каустобіолітах західних областей України / Є.І. Вульчин. – К. : Наукова думка, 1974. – 111 с.
5. Гаврилов В.П. Происхождение нефти / В.П. Гаврилов. – М. : Наука, 1986. – 176 с.
6. Гладков Е.А. Деформационно-метасоматические преобразования залежей углеводородов в процессе их разработки // Е.А. Гладков, А.В. Ежова, Л.К. Алтунина, В.А. Кувшинов, Н.А. Родионова, С.А. Переверзнецев, Е.Е. Гладкова // ЛИТОСФЕРА. – 2013. – № 2. – С. 167–172.
7. Ладыженский Н.Р. Геологическое строение и газоносность Советского Предкарпатья / Н.Р. Ладыженский, В.И. Антипов. – М. : Гостоптехиздат, 1961. – С. 266.
8. Лазаренко Є.К. Мінералогія осадочних утворень Прикарпаття / Є.К. Лазаренко, М.П. Габинет, О.П. Сливко. – Л. : Видавничий центр Львів. ун-ту, 1962. – С. 481.
9. Козлова О.Г. Рост кристаллов / О.Г. Козлова. – М. : Изд. МГУ, 1967. – 238 с.
10. Литвин А.Л. Силикаты / А.Л. Литвин, Л.Н. Егорова, В.Е. Тепикин, Д.К. Возняк и др. // В кн.: Минералы Украины. – К. : Наукова думка, 1990. – 407 с.
11. Петруняк Г.М., Петруняк М.Д. Сучасне мінералоутворення на Прикарпатті (постановка проблеми) / Г.М. Петруняк, М.Д. Петруняк // В сб. научных трудов посвященных 155-летию со дня рождения Павла Аполлоновича Тутковского. – Киев-Олевск, 2013. – С. 274–276.
12. Петруняк Г.М. О напизме, солёности и углеводородах Береговой скибы Карпат района поселка Делятин / Г.М. Петруняк, О.М. Черемисская, Ю.В. Черемисский, М.Д. Петруняк // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: 5 Всероссийская научно-техническая интернет-конференция. – Тула : ТулГУ, 2015. – С. 203–212.
13. Рипун М.Б. Про деякі аутигенні мінералоутворення в нафтових відкладах Передкарпаття / М.Б. Рипун, Л.Г. Ткачук // Геол. журн. – 1958. – Т. XVIII, вип. 4. – С. 32–37.

14. Субботин С.И. Глубинное строение Советских Карпат и прилегающих территорий по данным геофизических исследований / С.И. Субботин. – Изд. АН УССР, 1955 – 259 с.
15. Черемисская О.М. Геолого-структурные, литологические и палеогеографические аспекты формирования отложений стебникской свиты Предкарпатского прогиба // О.М. Черемисская, Ю.В. Черемисский // Материалы VII Всероссийского литологического совещания. – 2013. – Том III. – С. 251–254.
16. Шванов В.Н. Периодичность и направленность тектонических процессов и рядов осадочных формаций / В.Н. Шванов // В. кн.: Периодические процессы в геологии. – Л.: Недра, 1976. – С. 186–241.
17. Шукулюков Ю.А. Все ли понятно о феномене Окло? / Ю.А. Шукулюков // Природа. – № 7 [827]. – 1984. – С. 14–21.
18. England G.L., Rasmussen B., Krapez B., Groves D.I. Archaean oil migration in the Witwatersrand Basin of South Africa / G.L. England, B. Rasmussen, B. Krapez, D.I. Groves // Journal of Geological Society. – 2002. – V. 159. – Pp. 189–201.
19. Narebski W. W sprawie syderytów serii menilito-krosnieńskiej fliszu karpatskiego / W. Narebski // Przegląd Geol. – 1955. – Z. 2. – Pp. 84–85.
20. Narebski W. Mineralogia i geochemiczne warunki genezy tzw. syderytów fliszu karpatskiego / W. Narebski // Arch. Miner. – 1958. – T. XXI, z. 1. – 5–100 pp.
21. Tokarski J. О диаментах мрамароских / J. Tokarski // Kosmos. – 1905. – Vol. 30. – 443–468 pp.



УДК 550.837

Ив.М. Варенцов^{^1}, П.В. Иванов^{^1}, У. Аутио^{^2}, М.Ю. Смирнов^{^2}

СОВМЕСТНАЯ 3D ИНВЕРСИЯ МТ/МВ ДАННЫХ, ИМИТИРОВАННЫХ В МОДЕЛИ СОММЕМИ-3D3

Аннотация. Синтетические наборы данных стали важным полигоном изучения методов инверсии в сложно построенных неоднородных средах. Модель СОММЕМИ-3D3 уже длительное время служит основой для их генерации при изучении процедур совместной инверсии магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) данных. Она включает на фоне трёхслойной горизонтально-слоистой среды три аномальных тела, различающихся геометрическими размерами, глубиной залегания и значениями сопротивления. Контраст сопротивлений в ней превышает пять порядков. В этих условиях исследуется эффективность программ 3D инверсии (WSInv3DMT и ModEM) и сопоставляются различные оценки невязок в пространстве данных и модельных параметров.

Ключевые слова: синхронные МТ/МВ зондирования, совместная интерпретация данных, 3D обратные задачи, синтетические наборы данных.

Об авторах:

^{^1} Центр геоэлектромагнитных исследований, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Троцк.

^{^2} Университет Оулу, Финляндия.

Iv.M. Varentsov, P.V. Ivanov, U. Autio, M.Yu. Smirnov

JOINT 3D INVERSION OF MT/MV DATA SETS SIMULATED IN THE COMMEMI-3D3 MODEL

Abstract. Synthetic datasets became a useful tool to investigate the effectiveness of inversion techniques in complex inhomogeneous media. The COMMEMI-3D3 model serves for a long time as a base for such datasets generation in the study of joint magnetotelluric (MT) and magnetovariational (MV) data inversion procedures. It

includes three anomalous bodies with different sizes, depths and resistivities with the resistivity contrast exceeding five magnitude orders at the background of three-layered medium. In these frames, we study the effectiveness of 3D inversion codes (WSInv3DMT and ModEM) and compare different misfit estimates in spaces of data and modelling parameters.

Keywords: *simultaneous MT/MV soundings, joint data interpretation, 3D inversion problems, synthetic data sets.*

Современные вычислительные системы позволяют решать трудоемкие обратные задачи 3D инверсии в объёмных моделях среды. Появление новых программ для совместной 3D инверсий ансамблей МТ и МВ данных открывает в магнитотеллурике недоступные ранее возможности. Их рассмотрению и посвящена настоящая работа.

В фокусе исследований – набирающая всё большую популярность программа ModEM [1], опирающаяся на конечно-разностное решение прямой задачи, тихоновскую регуляризацию и современные средства оптимизации, балансирующие факторы точности и быстродействия. Важными ее преимуществами являются многопроцессорная реализация и возможность совместно инвертировать три передаточных оператора – импеданс, типпер и горизонтальный МВ отклик. Последний аспект определяет ее особую значимость при интерпретации материалов синхронных МТ/МВ зондирований. Однако существенным ее недостатком является использование традиционной среднеквадратичной метрики минимизируемого функционала, что затрудняет сходимость при инверсии многокомпонентных ансамблей данных с разной чувствительностью к различным элементам модели среды. Мы исследуем, как с помощью анализа различных невязок подбора, в том числе, частных невязок отдельных компонент инвертируемого ансамбля данных, можно диагностировать проблемы сходимости и настраивать процедуру инверсии для достижения наилучших результатов. В этом же направлении, помимо ModEM, в работе исследуется широко распространённая программа 3D инверсии WSInv3DMT [2], позволяющая инвертировать одни лишь импедансные данные.

Рассматриваемая модель СОММЕМІ-3D3 является достаточно простой структурно, но экстремальной по контрастам геоэлектрических неоднородностей и, в этой связи, создает существенные проблемы при решении прямых и обратных задач МТ/МВ методов. Данная модель схематично описывает среду, типичную для рудных АМТ съёмок, и расширяет набор тестовых 3D моделей международного проекта СОММЕМІ [3, 4], широко используемый для тестирования процедур решения прямых и обратных задач магнитотеллурики. Она состоит из серии аномалий различной формы и глубинности (рис. 1, 2), порождающих интерферирующие МТ/МВ отклики. Верхняя приповерхностная структура включает 5 однородных блоков (с сопротивлениями 30 и 300 Ом·м, глубиной верхних кромок 50 м, мощностями 250 и 400 м) и имеет горизонтальный размер 3×2,4 км. Средняя неоднородность с горизонтальным размером 1×2 км и сопротивлением 0,1 Ом·м залегает на глубине 200–1000 м, а нижняя квази-2D структура размером 1×5,6 км с сопротивлением 0,3 Ом·м, частично перекрытая приповерхностными блоками, расположена на глубине 1–3 км. 3D-образ аномальной модельной структуры показан на рис. 2. Аномальные тела располагаются в трёхслойном горизонтально-слоистом разрезе. Верхняя и средняя неоднородности лежат в первом слое с сопротивлением 10^3 Ом·м, нижняя – во втором с сопротивлением 10^4 Ом·м (в этом случае контраст сопротивлений максимален и достигает $3 \cdot 10^5$), сопротивление третьего слоя низкое – 10 Ом·м.

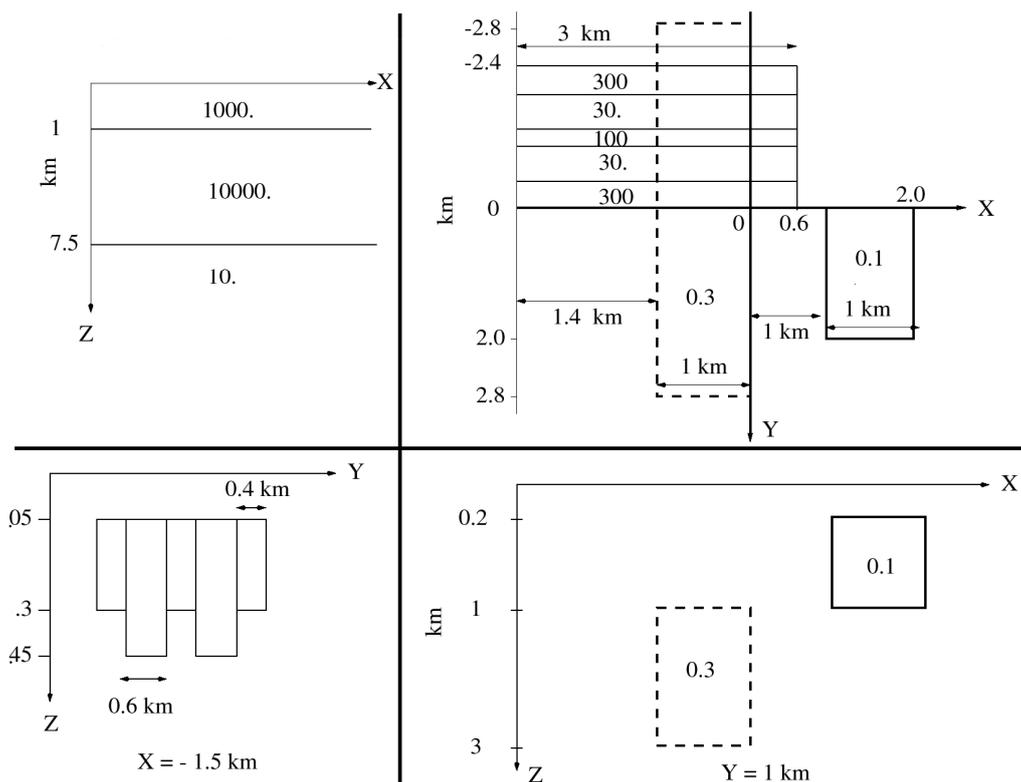


Рис. 4. Модель COMMEMI-3D3 в различных сечениях; значения сопротивлений (Ом·м) – цифры в пределах слоев и блоков

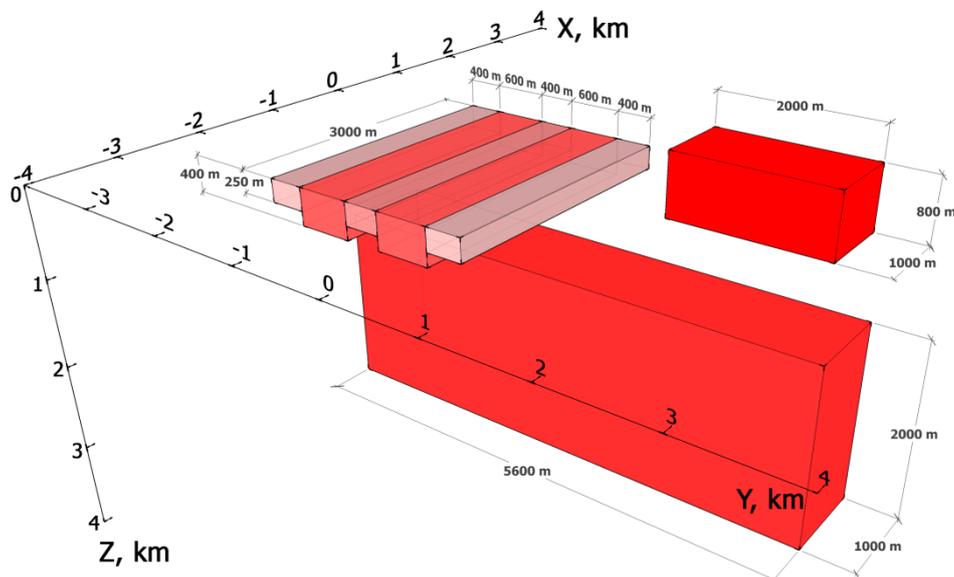


Рис. 5. Аномальная структура модели COMMEMI-3D3, значения сопротивлений изображенных блоков приведены на рис. 1

Массив «наблюденных» данных при инверсии ModEM включал 192 точки на 6 профилях длиной по 6 км каждый, расстояние между точками – 200 м, между профилями – 1200 м. При использовании WSInv3DMT из-за ограничений оперативной памяти взято только 80 точек на 8 профилях – расстояние между точками увеличено до 500 м.

Все данные рассчитаны для 13 периодов в диапазоне от 0,002 до 20 с. Модель аппроксимировалась на сетках, включающих в нижнем полупространстве $75 \times 84 \times 35$ ячеек для ModEM и $70 \times 74 \times 34$ ячеек для WSInv3DMT. Обе сетки имели одинаковые горизонтальные размеры ячеек 100×100 м в пределах аномальной части модели, при удалении от неё размеры ячеек увеличивались в геометрической прогрессии. В качестве стартовой модели на первом этапе исследований использовался истинный фоновый слоистый разрез (рис. 1).

На рис. 3 показаны различные горизонтальные срезы в геоэлектрической модели, построенной по результатам инверсии полного тензора импеданса по программе WSInv3DMT. Инвертировались точные данные, рассчитанные с помощью этой же программы, абсолютные погрешности в каждой импедансной строке задавались на уровне 1 % от соответствующих амплитуд главных компонент. В полученном решении структуры верхнего и промежуточного уровня разрешаются достаточно отчетливо как по горизонтали, так и по глубине. Нижняя структура также хорошо локализована по горизонтали, но имеет ложное положение по глубине, концентрируясь в пределах первого слоя фонового слоистого разреза. При этом сопротивления аномальных структур среднего и нижнего уровней явно завышены – превосходят $0,5\text{--}1$ Ом·м. Создается впечатление, что разрешающая способность данной процедуры инверсии падает с глубиной.

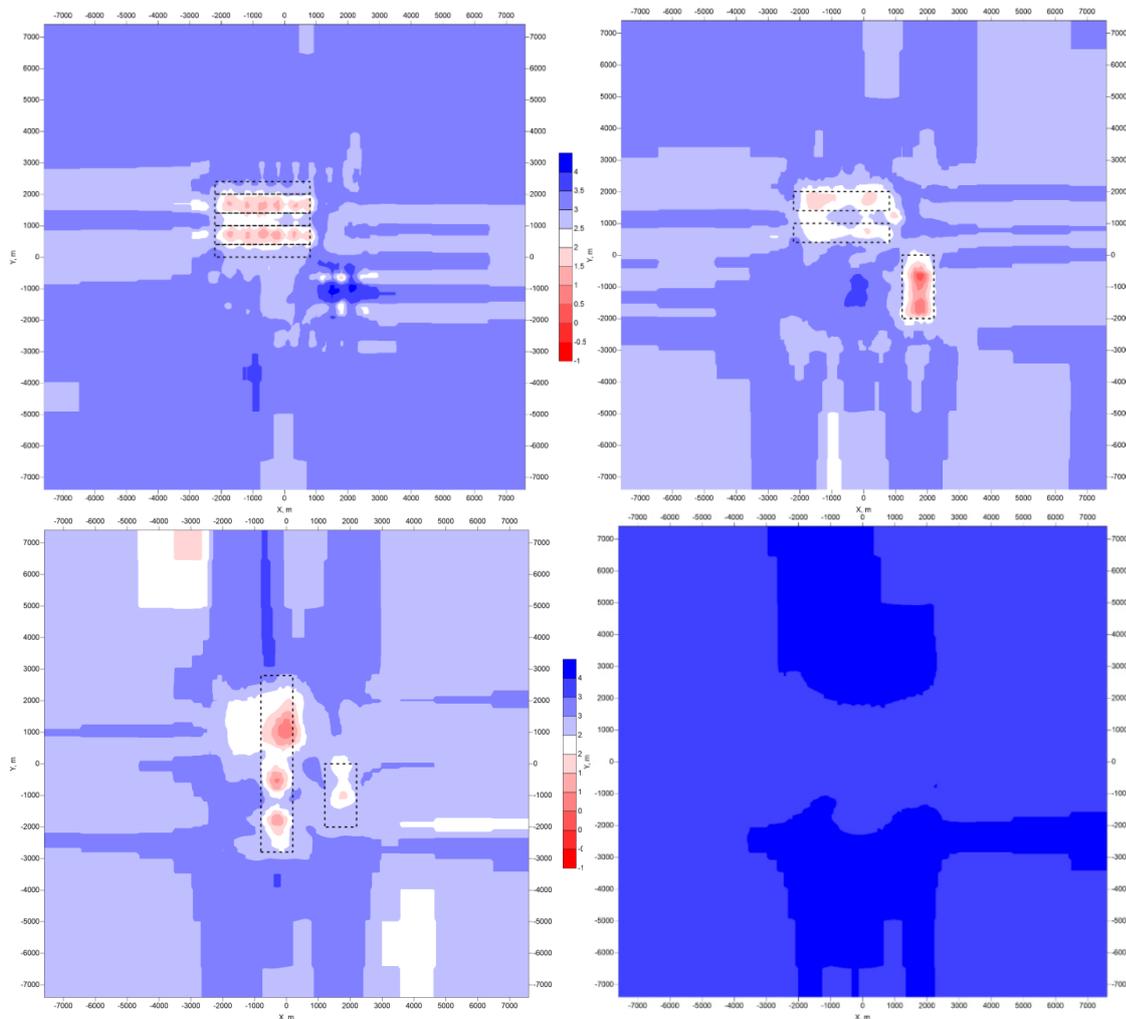


Рис. 6. Результаты 3D инверсии импедансных данных по программе WSInv3DMT в виде горизонтальных срезов сопротивления (Ом·м) на глубинах: 125 м – слева сверху, 412,5 м – справа сверху, 750 м – слева внизу, 1650 м – справа внизу; контуры структур верхнего и среднего уровней даны пунктиром

В программе WSIInv3DMT компоненты импеданса инвертируются в представлении (Re, Im), не являющемся оптимальным с учетом существенного убывания импедансных амплитуд при возрастании периода. Более естественным был бы подбор логарифма амплитуды (или логарифма соответствующего кажущегося сопротивления) и фазы [5, 6], однако эта возможность не реализована в данной программе. Остается лишь возможность с увеличением периодов уменьшать относительную погрешность инвертируемых данных. Аналогичная проблема возникает при инверсии импедансных данных и в программе ModEM, но в ней существует альтернативная возможность инверсии логарифма кажущегося сопротивления и фазы, распространяемая, однако, только на главные (антидиагональные) компоненты тензора. Таким образом, в модели СОММЕМІ-3D3 детальное разрешение глубинных структур, маскируемых приповерхностными неоднородностями, по одним лишь импедансным данным представляется затруднительным.

Далее мы исследуем возможности совместной инверсии данных импеданса, типера и горизонтального МВ отклика (до 20 действительных компонент в сумме) в программе ModEM. Для большей части рассматриваемых периодов (за исключением нескольких самых коротких) эффекты приповерхностных структур в МВ данных достаточно малы. Поэтому представляется перспективным сфокусироваться на разрешении глубинных структур путем увеличения весов (уменьшения погрешностей) МВ компонент. Для определения оптимальных весов компонент ведется покомпонентный анализ различных норм массивов невязок и погрешностей данных. На этом пути сопоставляются традиционные среднеквадратичные (L2) оценки и робастные порядковые статистики [6] – медианы и квантили 2/3 (Q67). Анализ частных абсолютных невязок (в особенности, их робастных оценок) позволяет эффективно и устойчиво сравнивать решения задачи инверсии, полученные при разных стратегиях взвешивания компонент данных, и, в силу этого, много предпочтительнее сопоставления сводных (по всему ансамблю данных) относительных L2-невязок (RMS).

Библиографический список

1. *Egbert G., Kelbert A.* Computational recipes for EM inverse problems // *Geophys. J. Int.* – 2012. – V. 189. – P. 251–267.
2. *Siripunvaraporn W.* 3D MT inversion: an introductory guide for developers and users // *Surv. Geophys.* – 2012. – V. 33. – P. 5–27.
3. *Жданов М.С., Варенцов И.М., Голубев Н.Г., Крылов В.А.* Методы моделирования ЭМ полей (материалы международного проекта СОММЕМІ). – М. : Наука. 1990. – 198 с.
4. *Zhdanov M.S., Varentsov Iv.M., Weaver J.T.* et al. Methods for modelling EM fields: Results from COMMEMI – the international project on the comparison of modelling methods for EM induction // *J. Appl. Geophys.* – V. 37(3–4). – P. 133–271.
5. *Варенцов Ив.М.* Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // *Физика Земли.* – 2002. – № 11. – С. 11–33.
6. *Varentsov Iv.M.* Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets // *EM sounding of the Earth’s interior: theory, modeling, practice.* Elsevier. – 2015. – P. 191–229.



УДК 550.837

И.М. Варенцов^{^1}, И.Н. Лозовский^{^1}

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РАЗВЕДОЧНОЙ И ДЛИННОПЕРИОДНОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СИНХРОННЫХ МТ/МВ ЗОНДИРОВАНИЙ ЛИТОСФЕРЫ

Аннотация. Представляется и иллюстрируется в рамках проектов KIROVOGRAD и EHS3D методика проведения синхронных магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) зондирований с интеграцией разведочной аппаратуры Phoenix MTU-5 и длиннопериодной аппаратуры LEMI-417M, а также совместной многоточечной обработки МТ/МВ данных с оценением трех передаточных операторов – импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика.

Ключевые слова: магнитотеллурический и магнитовариационный методы, синхронные наблюдения, глубинные зондирования, обработка данных, передаточные операторы.

Об авторах:

^{^1} Центр геоэлектромагнитных исследований, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Троицк.

I.M. Varentsov, I.N. Lozovsky

INTEGRATION OF THE EXPLORATION AND LONG-PERIOD INSTRUMENTS FOR THE SIMULTANEOUS MT/MV SOUNDINGS OF THE LITHOSPHERE

Abstract. *Advanced techniques for the simultaneous magnetotelluric (MT) and magnetovariational (MV) soundings integrating Phoenix MTU-5 and LEMI-417M instruments and for multisite processing of MT/MV data with the estimation of three transfer operators (impedance, tipper and horizontal MV response) are presented and illustrated in the frames of KIROVOGRAD and EHS3D projects.*

Keywords: *magnetotelluric and magnetovariational methods, simultaneous observations, deep soundings, data processing, transfer operators.*

Важная тенденция современного развития технологий глубинного МТ/МВ зондирования заключается в реализации схем синхронного наблюдения электромагнитных (ЭМ) полей и расширении частотного диапазона наблюдений до 6–8 декад. Фактор синхронности обеспечивает существенный прогресс в подавлении ЭМ помех на пути использования многоточечных алгоритмов оценивания передаточных операторов и расширение ансамбля интерпретируемых данных за счет синхронных передаточных операторов [1–7]. Построение надежных оценок МТ/МВ передаточных операторов в диапазоне периодов 0,01–10000 с позволяет получать информативные глубинные отклики, характеризующие корово-мантийные геоэлектрические структуры, и контролировать искажающие их приповерхностные неоднородности. Авторами накоплен значительный опыт проведения подобных синхронных широкодиапазонных глубинных зондирований при совместном использовании длиннопериодной (LEMI, GEOMAG и пр.) и разведочной (Phoenix) аппаратуры [4, 8, 9].

Цифровая МТ станция LEMI-417M (Львовский центр Института космических исследований НАН Украины) обладает 3 магнитными и 4 электрическими каналами для измерения вариаций ЭМ поля. Ее динамический диапазон составляет $-/+68\ 000$ нТл для магнитных и $-/+600$ мВ для электрических каналов, разрешение – соответственно, 10 нТл и 0,07 мкВ. АЦП станции с разрядностью 16 бит работает в непрерывном режиме с дискретизацией 1 Гц. Магнитометр использует трехкомпонентный феррозондовый датчик, размещенный в термостабильном корпусе, и обладает высокой чувствительностью на длинных периодах. Аппаратура обеспечивает надежное оценивание передаточных функций на периодах от 10–30 до 10000–20000 с. Резерв электрических каналов позволяет вести измерения на дополнительных электрических линиях, отличающихся длиной и/или ориентацией.

Станция Phoenix MTU-5 (Phoenix Geophysic Ltd., Канада) позволяет регистрировать вариации ЭМ поля в диапазоне периодов 0,003–2000 с. АЦП станции отличается высокой разрядностью 24 бит. Параллельная запись измерений осуществляется непрерывно с дискретизацией 15 Гц и интервально с дискретизациями 150 и 2400 Гц. Измерение 3 компонент магнитного поля ведется с использованием индукционных датчиков МТС-50.

Типичные амплитудно-частотные характеристики феррозондового магнитометра станции LEMI-417M и индукционных датчиков МТС-50 представлены на рис. 1 и 2. При глубинных зондированиях длительностью 2–3 дня и среднем уровне ЭМ шумов интеграция наблюдений LEMI и непрерывных записей Phoenix позволяет получить качественные оценки передаточных операторов в диапазоне 5 декад периодов (порядка 0,5–5000 с). Такие зондирования велись в течение нескольких последних лет в эксперименте KIROVOGRAD и обеспечили глубинность исследований в пределах всей земной коры. Продление времени регистрации до одной недели и привлечение высокочастотных интервальных записей Phoenix расширяет диапазон периодов в обе стороны до 7 декад. Подобные наблюдения проводились в 2007 и 2009 гг. в эксперименте EHS3D и позволили изучать геоэлектрическую структуру земной коры и верхней мантии до глубин 200–300 км.

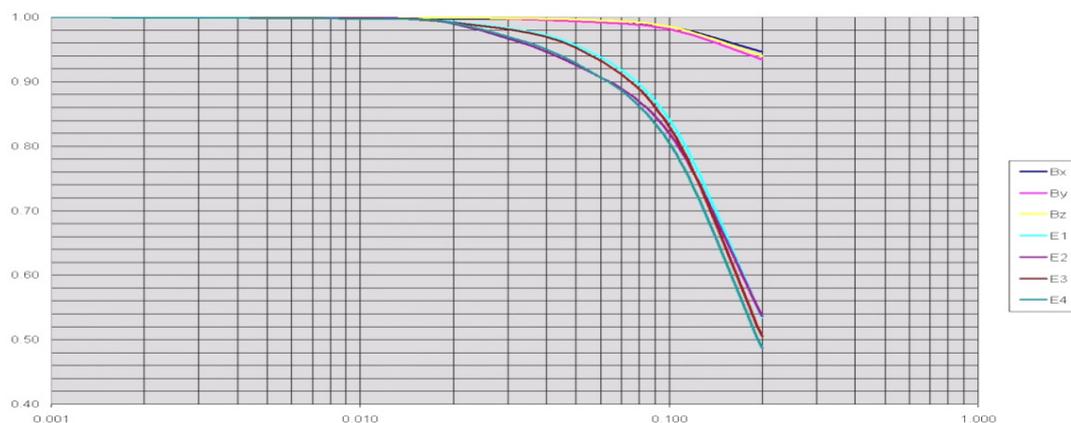


Рис. 1. Типичные амплитудные характеристики каналов станции LEMI 417M, единичные для частот менее 0,001 Гц; по горизонтали – частота (Гц, lg-масштаб)

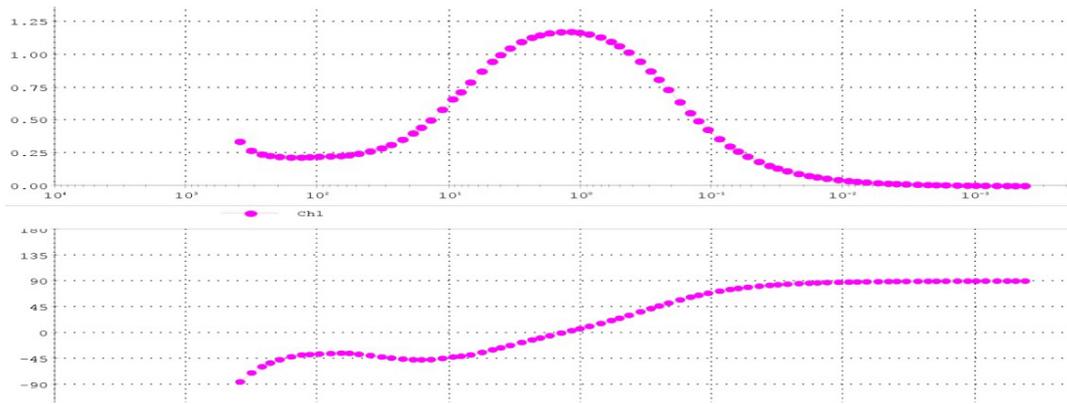


Рис. 2. Типичные амплитудно-фазовые характеристики индукционных датчиков МТС-50; по горизонтали – частота (Гц, lg-масштаб)

Обработка сводного массива данных LEMI/Phoenix велась в рамках многоточечной схемы с применением системы PRC_MTMV (ЦГЭМИ ИФЗ РАН) [1, 2, 6, 7] и дополнительным использованием интерактивной программы MT-Corrector (ООО «Северо-Запад»). В системе PRC_MTMV по записям двух станций проводилось независимое оценивание импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика по синхронным наблюдениям, включающим 2–4 полевых или стационарных пункта, удаленных от точки зондирования. Традиционные алгоритмы когерентностной отбраковки частных оценок передаточных операторов [1] дополнялись алгоритмы отбраковки на основе критериев ограничения пространственной и частотной изменчивости горизонтальных МВ откликов, более эффективными при подавлении пространственно-коррелируемых помех [2, 6, 7]. Далее выполнялось многоуровневое робастное осреднение отобранных данных (включая многооконное и мульти-RR) [1, 7]. Также велось двухточечное RR-оценивание импеданса и типпера по фирменной технологии Phoenix с последующим построением сглаживающих сплайнов в режиме интерактивной отбраковки искаженных данных в программе MT-Corrector. Обработка завершилась еще одним уровнем робастного осреднения оценок, полученных различными способами для двух видов аппаратуры.

В рамках проекта KIROVOGRAD развернут первый на постсоветском пространстве масштабный эксперимент глубинного МТ/МВ зондирования, охватывающий западный склон Воронежского массива и прилегающие территории (49–55° с.ш., 30–37° в.д.), включающий более 200 новых пунктов синхронных наблюдений 2006–2014 гг. и дополненный результатами более 300 локальных зондирований прошлых лет [4, 7, 10, 11]. Регион исследований характеризуется интенсивными и разнообразными по природе ЭМ помехами, порождаемыми электрифицированными железными дорогами на постоянном и переменном токе, электростанциями и высоковольтными ЛЭП, системами катодной защиты трубопроводов, крупными горнодобывающими предприятиями и другими объектами промышленной и городской инфраструктуры. Для более надежного подавления этих помех с 2012 г. большинство синхронных зондирований в эксперименте KIROVOGRAD ведутся совмещенными станциями LEMI и Phoenix. Одновременно регистрируются магнитные вариации на геофизической базе МГУ в д. Александровка Калужской обл. (ALX) и геомагнитной обсерватории «Киев» (KIV).

На рис. 3 показаны результаты оценивания главных компонент импеданса в точке эксперимента со средним уровнем помех. Одноточечные (SS) оценки по данным Phoenix искажены на длинных периодах, остальные – лежат в плотной полосе. Данные

LEMI и Phoenix на средних и длинных периодах дополняют друг друга, итоговое робастное осреднение дает качественные результаты для периодов 0,25–6000 с. На рис. 4 приведены аналогичный по структуре набор оценок импеданса в точке с высоким уровнем помех, расположенной на небольшом удалении от электрифицированной (на постоянном токе) ж./д. Здесь все данные Phoenix, полученные в PRC_MTMV, существенно искажены на периодах более 100–300 с и сильно отличаются от мало искаженных данных LEMI. Сплайны, полученные в MT-Corrector, подавляют искажения, но порождают значительные смещения в yx -компоненте. На коротких периодах (менее 20 с) остаются расхождения между RR-оценками относительно ALX, полученным по технологиям PRC_MTMV и Phoenix/MT-Corrector, однако они заметно лучше немонотонных одноточечных оценок. В целом, несмотря на отмеченные явные искажения, мульти-RR осреднение дает удовлетворительные результаты для периодов 0,25–4000 с. Это подтверждает целесообразность комплексирования аппаратурных и программных инструментов.

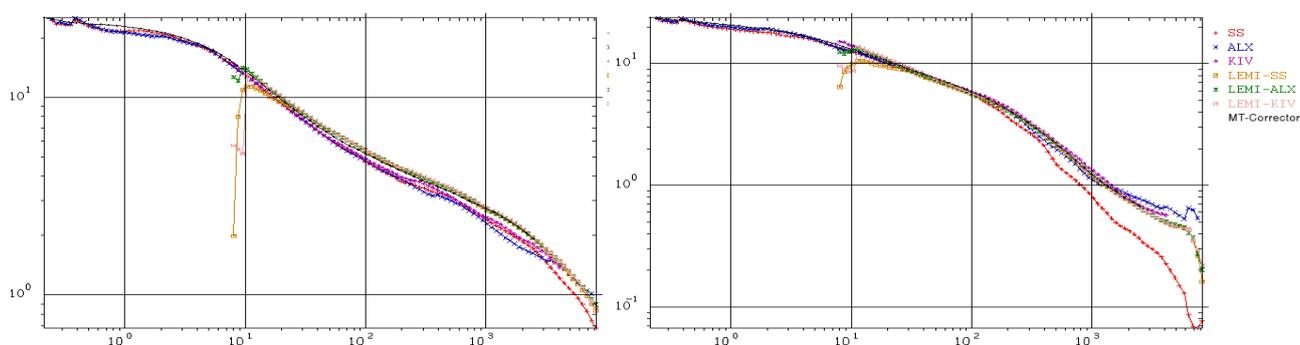


Рис. 3. МТ зондирование со средним уровнем ЭМ помех – результаты оценивания амплитуды главных компонент импеданса (xy – слева, yx – справа; мВ/км/нТл) в системе PRC_MTMV по данным Phoenix (первые три кривых) и LEMI (вторые три кривых); SS – одноточечные оценки, ALX и KIV – RR-оценки относительно указанных пунктов; последняя кривая – результат фирменной RR-обработки (относительно ALX) данных Phoenix с последующим применением программы MT-Corrector; по горизонтали – период (с, lg-масштаб)

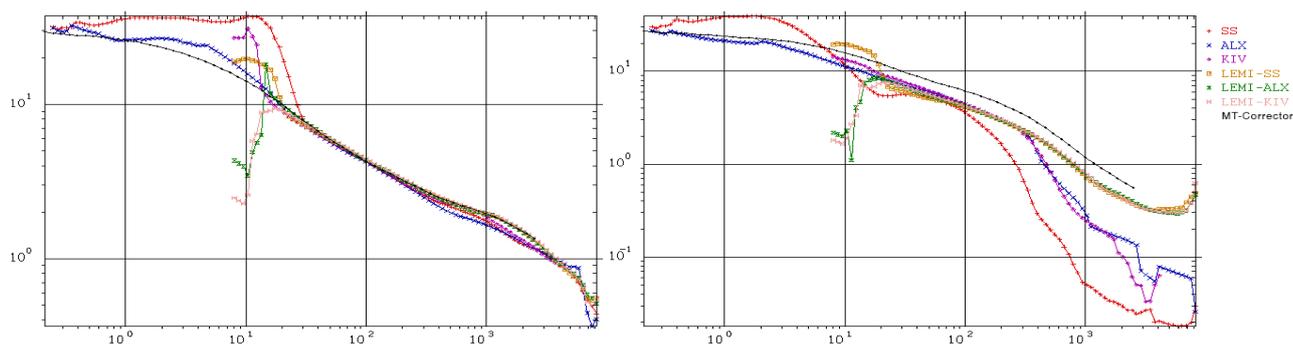


Рис. 4. МТ зондирование с высоким уровнем ЭМ помех – результаты оценивания амплитуды главных компонент импеданса (обозначения – как на рис. 3)

В 2007–2009 г. в рамках международного проекта EHS3D Институтом геологии и геофизики Китайской АН выполнены синхронные МТ/МВ зондирования с длиннопериодной аппаратурой LEMI (недельные) и разведочными инструментами Phoenix (суточные) с целью изучения геоэлектрической структуры тектоносферы Восточного Тибета [8, 9]. Исследования велись на геотраверсах EHS-2 и EHS-3 (протяженностью бо-

лее 1000 км каждый) и в геомагнитных обсерваториях региона. Обработка полученных данных велась в ЦГЭМИ ИФЗ РАН по рассмотренным выше методикам. Получены сводные импедансные кривые по данным Phoenix и LEMI в ~50 пунктах в диапазоне периодов 0,08–12000 с, превышающем 5 декад [9]. Достигнута высокая точность стыковки фазовых кривых для двух типов аппаратуры (рис. 5). В ряде точек исходные фазовые кривые в результате приповерхностных гальванических эффектов выглядели экзотично, покидая 1D-квадрант (рис. 5, слева), в то время как соответствующие компоненты фазового тензора [12] обретали нормальный вид (рис. 5, справа).

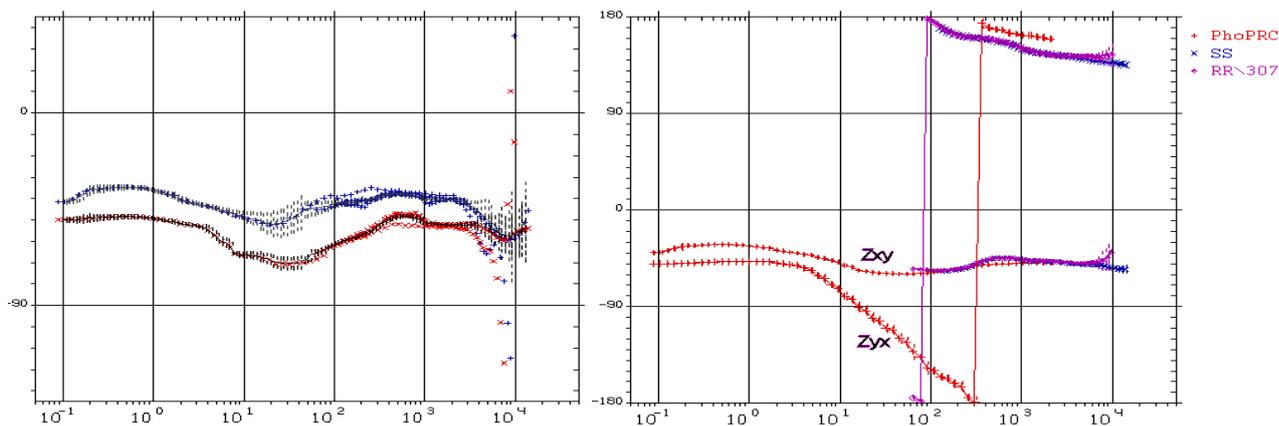


Рис. 5. Импедансные фазовые отклики (град.) в т. 311 эксперимента EHS3D [9] по данным Phoenix (PhoPRC, локальная оценка) и LEMI (SS, локальная оценка, RR\307, RR-оценка относительно удаленной т. 307): слева – исходные ху- и ух-кривые, справа – аналогичные кривые, извлеченные из фазового тензора импеданса [12], сплошные черные линии справа – результат робастного осреднения 3 исходных оценок; горизонтальные оси – период (с, lg-масштаб)

При оценивании МВ операторов в эксперименте KIROVOGRAD достигнута точность сводных оценок LEMI/Phoenix, сопоставимая с точностью импедансных данных [4, 11]. В эксперименте EHS3D в условиях экстремального высокогорья качество МВ оценок по данным Phoenix оказалось существенно ниже оценок по данным LEMI в силу существенно меньшей длительности наблюдений и влияния ветровых помех, поэтому оценивание этих откликов относительно геомагнитных обсерваторий с дискретизацией данных 1 Гц основывалось только на данных LEMI [8, 9].

Библиографический список

1. *Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р. и др.* Методика построения передаточных операторов ЭМ поля для массива синхронных зондирований BEAR // *Физика Земли.* – 2003. – № 2. – С. 30–61.
2. *Varentsov Iv.M.* Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis // *EM sounding of the Earth's interior.* Elsevier. 2007. – P. 263–277.
3. *Ernst T., Brasse H., Cerv V. et al.* EM images of the deep structure of the Trans-European Suture Zone beneath Polish Pomerania // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – V. 35. – L15307. – 5 p.
4. *Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др.* Синхронные МТ и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // *Геофиз. журн.* – 2012. – Т. 34. – № 4. – С. 90–107.
5. *Варенцов Ив.М., Куликов В.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В.* Возможности методов магнитотеллурики в задачах рудной геофизики // *Физика Земли.* – 2013. – № 3. – С. 9–29.
6. *Варенцов Ив.М.* Программная система PRC_MTMV для обработки данных синхронных МТ/МВ зондирований // *Материалы VI Всероссийской школы-семинара по ЭМ зондированиям им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна.* – Новосибирск : ИНГГ, 2013. – 4 с.
7. *Varentsov Iv.M.* Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis and inversion // *EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice.* Elsevier. – 2015. – P. 271–299.

8. *Xiao P., Bai D., Varentsov Iv.M. et al.* Study on long-period MT sounding: The LMT transfer functions in eastern Tibetan Plateau // *Seismology and Geology*. – 2010. – V. 32(1). – P. 38–50 (in Chinese).
9. *Варенцов Ив.М., Бай Д.* Геоэлектрическая модель тектоносферы Восточного Тибета по данным глубинных и разведочных МТ/МВ зондирований // *Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов*. – 2015. – С. 169–177 (В печати).
10. *Александрова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А.* и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // *Геофизика*. – 2013. – № 2. – С. 32–38.
11. *Варенцов Ив.М., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В.* и др. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы). – Киев : Логос, 2013. – 118 с.
12. *Caldwell G.T., Bibby H.M., Brown C.* The MT phase tensor // *Geophys. J. Int.* – 2004. – V. 158. – P. 457–469.



УДК 550.372

*Е.В. Агеенков*¹, *П.Ю. Легейдо*

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОДНОМЕРНЫХ СРЕД ПРИ ИНДУКЦИОННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ И ПРИЁМЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Аннотация. На основе численного эксперимента определены некоторые проблемы изучения численных характеристик процесса вызванной поляризации (ВП) при индукционном возбуждении электромагнитного поля и индуктивной регистрации отклика от горизонтально-слоистой проводящей поляризующейся Земли.

Ключевые слова: индукционно вызванная поляризация, индуктивный источник электромагнитного поля, модель Коула-Коула, частотная дисперсия проводимости, ЗСБ.

Об авторах:

¹ ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», Иркутск.

E.V. Ageenkov, P.Yu. Legeydo

THE STUDY OF THE PARAMETERS OF ONE-DIMENSIONAL AREAS INDUCED POLARIZATION UPON INDUCTION EXCITATION AND RECEPTION OF ELECTROMAGNETIC FIELD

Abstract. On the basis of numerical experiment some problems in the study of the numerical characteristics of the process of induced polarization (IP) with inductive excitation of the electromagnetic field and inductive reception of the response from a horizontally-layered conductive polarized Land. have been identified.

Keywords: induction induced polarization, inductive electromagnetic field source, the model of Cole-Cole frequency dispersion of conductivity, TEM.

При прохождении электрического тока через двухфазную (многофазную) среду возникают процессы разделения носителей электрических зарядов под его воздействием, а после прекращения воздействия этого внешнего для среды тока происходит раз-

рядка запасённой энергии в виде токов вызванной поляризации (ВП). Интенсивность токов ВП зависит от свойств геологической среды, а регистрируемый на её поверхности отклик может показывать присутствие некоторых минералов (графита, пирита и т. д.) [5] или диагностировать физико-химические изменения геологических образований [7]. Поэтому вызванная электрическая поляризация используется для решения ряда рудных и нефтегазопоисковых задач.

Зачастую в разведочной геофизике источником тока для изучения процессов ВП служит заземлённая электрическая линия и последовательность прямоугольных импульсов тока низкой частоты подаваемых в среду с её помощью. В этом случае основную часть процессов ВП порождает гальванический ток, текущий между двумя заземлениями линии АВ. Однако при использовании в качестве источника индуктивной петли в среде также возникают процессы ВП индукционной природы, вызванные вихревым током [3]. Переходные процессы в присутствии индукционно-вызванной поляризации (ИВП), регистрируемые индуктивным приёмником, отличаются от становления над проводящей средой и не могут быть аппроксимированы лишь изменением проводимости разреза с глубиной. Для их описания требуется вводить частотную дисперсию сопротивления (проводимости) среды.

Нужно отметить, что решение обратной задачи электроразведки, как правило, ведётся в области моделей ограниченной априорными представлениями о геоэлектрической среде. Тем не менее, если о распределении проводимости среды можно получить дополнительные сведения из каротажных исследований, то о поляризационных характеристиках среды таких сведений практически нет, поэтому ограничить изменение поляризационных параметров модели можно лишь основываясь на опыте.

За последние годы появился ряд публикаций, посвящённых теоретическому изучению сигналов над проводящими поляризующимися средами [2, 4]. Позднее, в журнале «Геофизика» №1 за 2013 г., была опубликована статья «Проявление и учёт индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ» авторами С.В. Компаниец, Н.О. Кожевниковым и Е.Ю. Антоновым [6]. В статье приводится пример, когда полевые записи многоразностной установкой ЗСБ возможно аппроксимировать только моделями с присутствием частотной дисперсии сопротивления, описываемой формулой Коула-Коула (1).

$$\rho(\omega) = \rho(0) \cdot \left(1 - \frac{\eta(\omega\tau)^c}{1+(\omega\tau)^c}\right), \quad (1)$$

где $\rho(0)$ – удельное электрическое сопротивление (УЭС) на постоянном токе (Ом·м); η – коэффициент поляризуемости (доли ед.), равный $\frac{\rho(0) - \rho(\infty)}{\rho(0)}$, где $\rho(\infty)$ – УЭС на бесконечно высокой частоте; τ – время релаксации или постоянная времени (с.); c – показатель степени (б.р.); ω – круговая частота (сек.⁻¹).

Авторы указанной статьи показывают, что учёт поляризуемости снимает проблему появления на геоэлектрических разрезах и картах сопротивления не существующих в реальности геологических объектов. В результате инверсии полевых данных проявление ИВП связаны с породами верхней части разреза с параметрами: $\rho = 5 \dots 160$ Ом·м, $\eta = 1 \dots 14$ %, $\tau = 0,02 \dots 0,5$ с, $c = 0,5 \dots 0,6$ б.р. Публикация, безусловно, является значительным шагом на пути решения проблемы изучения ИВП, но в ней не затронут вопрос эквивалентности поляризационных параметров модели, уже исследованный ранее для возбуждения электрической линией [1].

Чтобы восполнить пробел, был проведён численный эксперимент, результаты которого описаны ниже. Нужно отметить, что расчёты проведены для одной модели ха-

рактерной для юга Сибирской платформы, поэтому выводы, сделанные в ней, нельзя назвать общими и вопрос требует более глубокого исследования.

Описание численного эксперимента

Задачи исследования: получить синтетический отклик от одномерной проводящей поляризующейся среды для многоразностной установки ЗСБ; решить ряд обратных задач для этого отклика для нахождения эквивалентных моделей, позволяющих описать синтетический отклик с невязкой менее 5 % по ЭДС.

Уровень невязки в 5 % выбран, основываясь на точности измерений, определённой инструкцией по электроразведке.

Для инверсии использовался метод главных осей [8], основанный на аппроксимации оврага целевой функции кривой второго порядка и движению по оврагу с поиском нескольких локальных минимумов.

В таблице 1 представлена модель для расчёта референтного отклика – это типичная геоэлектрическая модель юга Сибирской платформы с переслаиванием относительно проводящих и высокоомных образований (предоставлена одним из авторов [6] Е.Ю. Анотоновым).

Таблица 1

Слой	$\rho, \text{ Ом*м}$	$\eta, \%$	$\tau, \text{ с}$	$c, \text{ б.р.}$	$h, \text{ м}$
1	32,8				43,5
2	12,8	3,6	0,06	0,5	81,5
3	37,2				106,5
4	103,2				352
5	37,9				573
6	246,2				665
7	25,6				530
8	33,5				350
9	2000				∞

Время расчёта сигнала от 0.5 мс до 1.2 с. Схема установки предполагала расчёт сигнала становления на трёх датчиках: соосном и удалённых от центра питающей петли на 500 и 1000 м (рис. 1). В качестве источника задавалась квадратная петля с длиной стороны 500 м.

Невязка во время решения обратной задачи рассчитывалась по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{2 \cdot (\text{ЭДС}_P(t_i) - \text{ЭДС}_\Pi(t_i))}{\text{ЭДС}_P(t_i) + \text{ЭДС}_\Pi(t_i)} \right)^2}, \quad (2)$$

где индекс Р обозначает сигнал от референтной модели, индекс П обозначает сигнал от текущей модели, изменяющейся в процессе инверсии.

Распределение невязки во времени рассчитывалось по формуле:

$$\delta(t) = \frac{2 \cdot (\text{ЭДС}_P(t) - \text{ЭДС}_\Pi(t))}{\text{ЭДС}_P(t) + \text{ЭДС}_\Pi(t)},$$

где значение индексов аналогично (2).

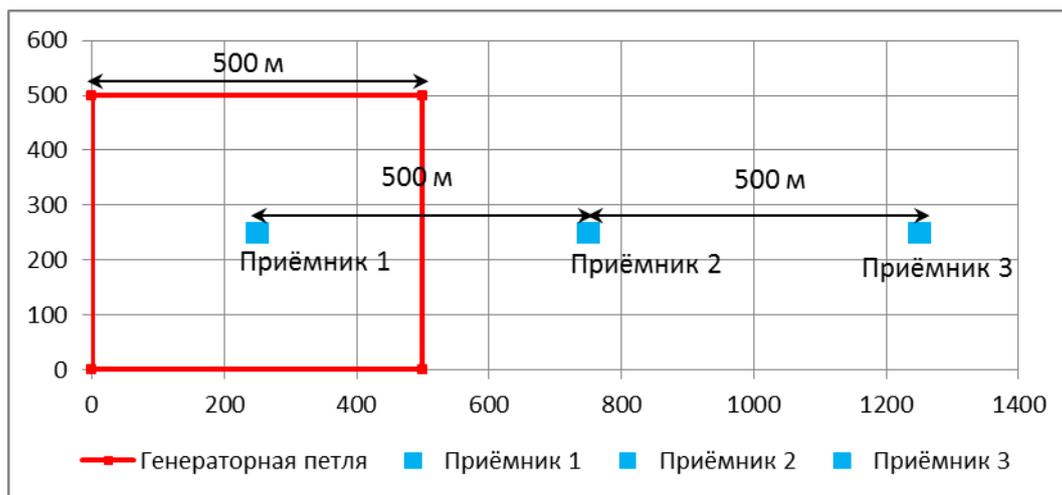


Рис. 1. Схема многоразносной установки ЗСБ для расчёта сигнала, состоящая из трёх приёмников: соосном и удалённых на 500 и 1000 м

Для поиска эквивалентных моделей первоначально закреплялось время релаксации на смещённых значениях относительно истинного: 1, 0,001 и 10 с (рис. 4). В результате решения обратной задачи были найдены эквивалентные решения (модели М1, М2 и М3) с общей невязкой по ЭДС для трёх измерителей 4,95 (рис. 2), 3,39 и 4,99 % соответственно. Затем, поляризующимся в модели был только первый слой, далее только третий. При этом во время решения обратной задачи были раскреплены все поляризационные параметры этих слоёв. Эквивалентные аппроксимации (модель М4 и М5) были получены с невязкой 4,17 и 3,87 % соответственно.

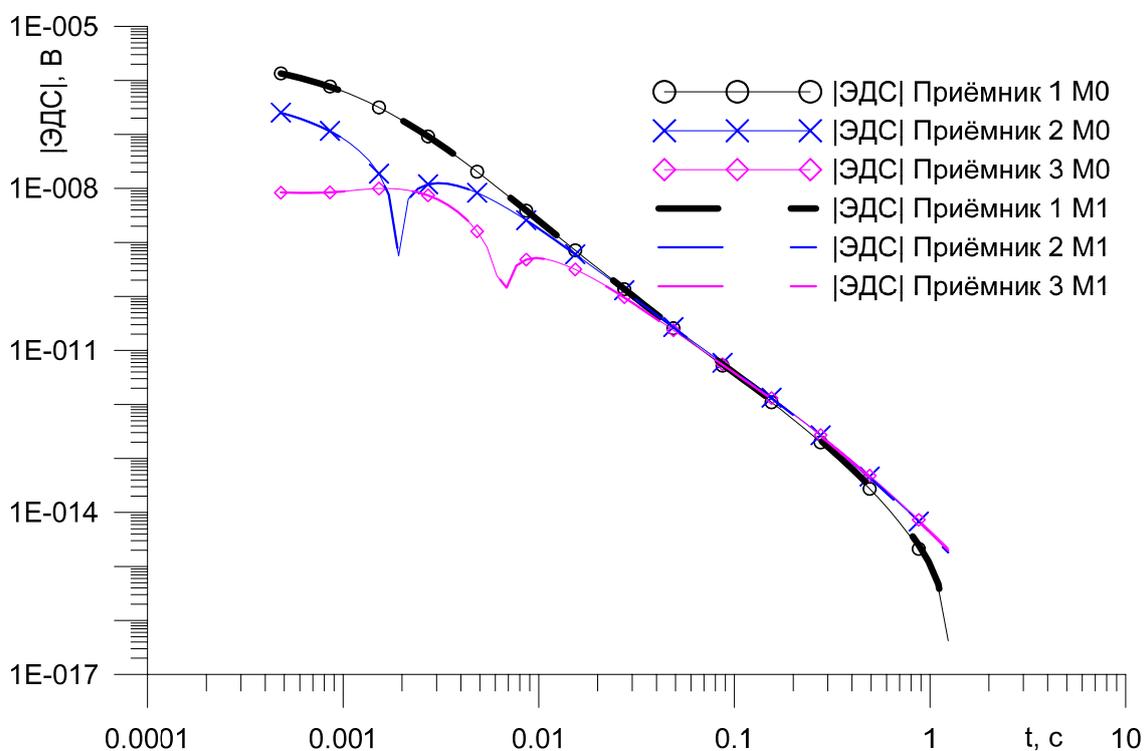


Рис. 2. ЭДС от референтной (с индексом М0) и от эквивалентной модели М1 (с индексом М1) для многоразносной установки ЗСБ. Невязка: 4,95 %

Не удалось найти эквивалентного решения при помещении поляризуемости в четвёртый слой (модель М6), невязка составила 6,26 %.

Основная невязка для эквивалентных аппроксимаций сосредоточена на поздних временах спада от 300 мс до 1,2 с, больше она для сигнала на соосном датчике (рис. 3). Только в последнем случае, когда поляризующимся является четвёртый слой (модель 6), максимальные расхождения сигнала для измерителя, удалённого на 500 м.

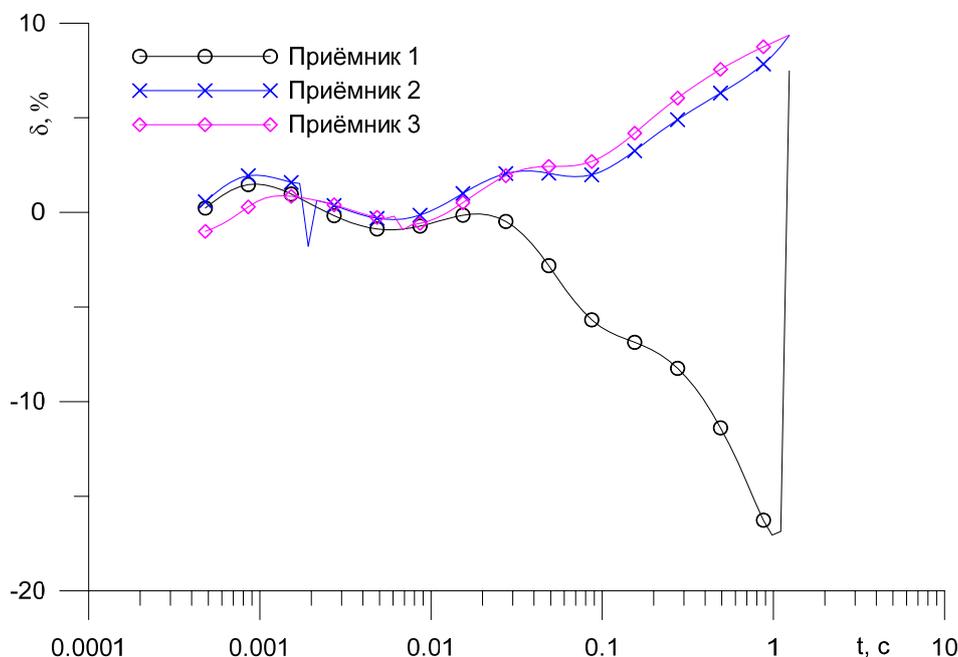


Рис. 3. Распределение невязки ЭДС во времени между откликом от референтной и от эквивалентной модели М1 для многоуровневой установки ЗСБ

Нужно отметить, что УЭС и проводимость слоёв для эквивалентных моделей незначительно отличаются от референтных значений. Только для модели М6 суммарная продольная проводимость отличается от референтной более чем на 10 %, в остальных случаях различие не более 5 % (рис. 6).

Выводы

Выводы, которые можно сделать из проведённого исследования:

- имеется чувствительность индукционного отклика к поляризационным параметрам референтной модели;
- отклик от данной референтной модели в пределах погрешности наблюдений 5 % можно аппроксимировать рядом эквивалентных моделей, поэтому можно утверждать, что существует широкая область эквивалентных поляризующихся моделей;
- для данной модели по индукционному отклику нельзя определить, в каком слое находится поляризующийся объект;
- для данной модели нельзя определить численные значения поляризационных характеристик;
- чтобы сделать глобальные выводы о пределах действия эквивалентности поляризационных параметров при индукционном возбуждении разреза и индукционном измерении сигнала, необходимо провести более масштабные исследования.

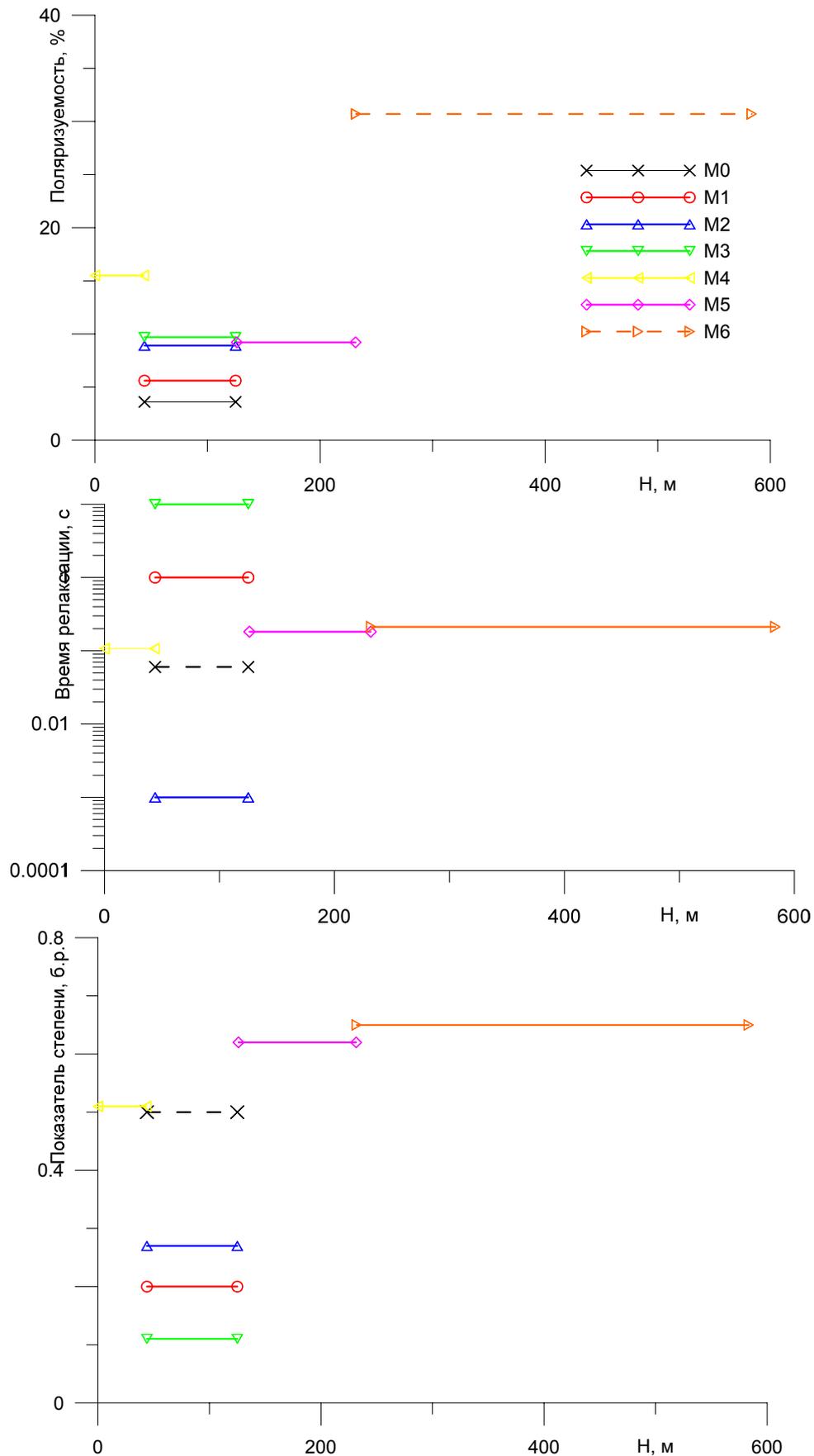


Рис. 4. Поляризационные параметры (поляризуемость (вверху), время релаксации и показатель степени (внизу) по слоям для референтной (M0) и эквивалентных моделей (M1-M6)

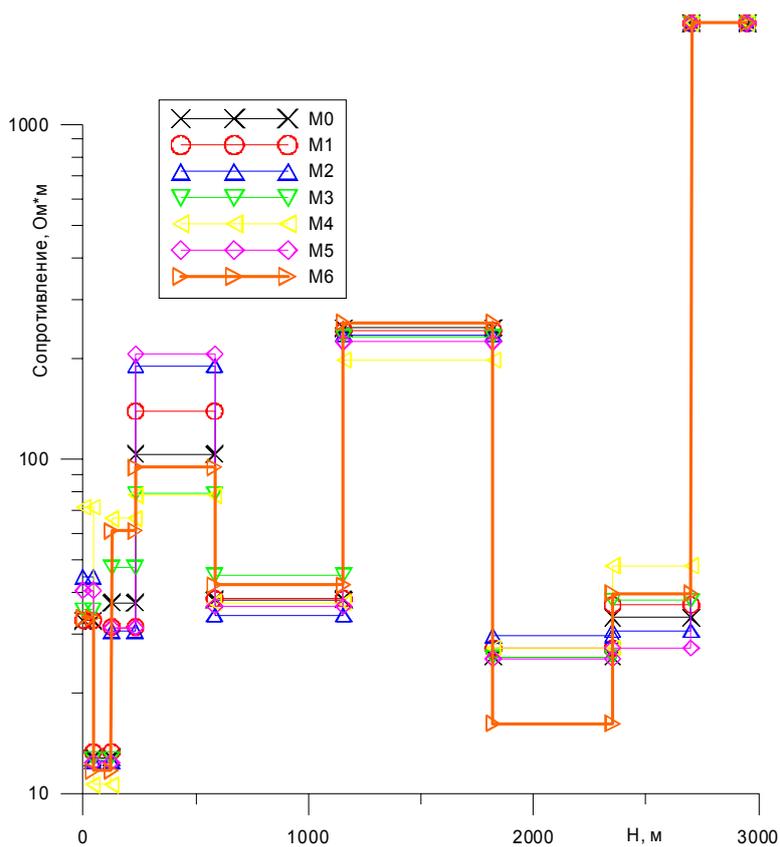


Рис. 5. Графики изменения сопротивления по слоям для референтной (M0) и эквивалентных моделей (M1-M6)

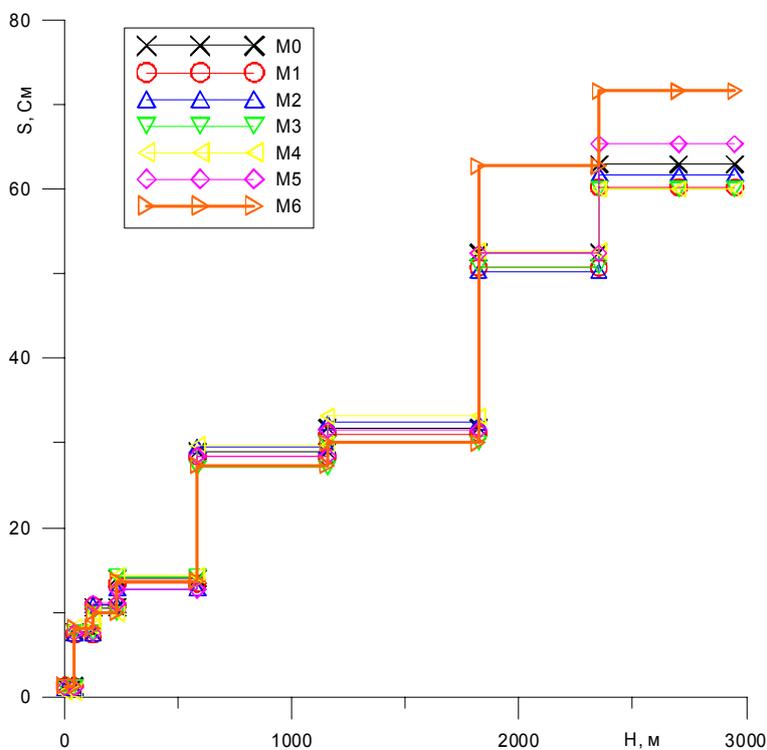


Рис. 6. Графики накопленной проводимости по слоям для референтной (M0) и эквивалентных моделей (M1-M6)

Библиографический список

1. Агеенков Е.В. Исследование эквивалентностей горизонтально-слоистых поляризующихся сред в дифференциально-нормированном методе электроразведки // Автореферат дисс. канд. геол.-мин. наук. – Иркутск, 2004. – 18 с.
2. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Инверсия данных МПП с учётом быстро протекающей индукционно вызванной поляризации: численный эксперимент на основе модели однородного поляризующегося полупространства // Геофизика. – 2007. – № 1. – С. 42–50.
3. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. – 2009. – № 4, Т. 31. – С. 104–118.
4. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Совместная инверсия данных МПП с учётом индукционно вызванной поляризации // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 2. – С. 181–190.
5. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Ленинград : Недра, 1980. – 391 с.
6. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учёт индукционно вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. – 2013. – № 1. – С. 35–40.
7. Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений / И.С. Старобинец, А.В. Петухов, С.Л. Зубайраев / под ред. А.В. Петухова и И.С. Старобинца. – М. : Недра, 1993. – 332 с.
8. http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/pdf/03_praxis.pdf.



УДК 550.837.211

Д.А. Алексеев^{1,2}, А.Г. Нурмухамедов³, И.И. Чернев⁴, А.Г. Яковлев^{1,5}

ТРЕХМЕРНАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МУТНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРОГИДРОТЕРМ

Аннотация. В докладе приводятся результаты интерпретации данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ), полученных в районе Мутновского месторождения парогидротерм (Камчатка) в период с 2004 по 2014 гг. Обсуждаются подходы к интерпретации магнитотеллурических данных в ситуации, характеризующейся существенными трехмерными искажениями и явлением берегового эффекта. Представлена результирующая 3D-геоэлектрическая модель.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, гидротермальные ресурсы, геоэлектрическая модель.

Об авторах:

¹ ООО «Северо-Запад», Москва.

² Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва.

³ ОАО «Камчатгеология», Петропавловск-Камчатский.

⁴ ОАО «Геотерм», Петропавловск-Камчатский.

⁵ Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва.

D.A. Alekseev, A.G. Nurmuhamedov, I.I. Chernov, A.G. Yakovlev

3-D CONDUCTIVITY MODEL OF THE MUTNOV GEOTHERMAL FIELD

Abstract. We present the results of the interpretation of magnetotelluric (MT) data acquired in the Mutnov geothermal field area during the period from 2004 to 2014. Approaches to an interpretation of MT data in

settings, characterized by significant 3D distortions and the coastal effect are discussed. The final 3D conductivity model is presented.

Keywords: magnetotellurics, geothermal resources, conductivity model.

В период с 2004 по 2014 гг. был выполнен большой объём электроразведочных работ методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) в районе Мутновского месторождения парогидротерм, находящегося в 120 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский, с целью его геологического доизучения, направленного на обеспечение теплоносителем Мутновской геотермальной электростанции (ГеоЭС). Основные задачи этих исследований состояли в уточнении геологического строения и выявлении зон распространения гидротерм. Предпосылки к использованию методов геоэлектрики при поисках и картировании гидротерм обеспечиваются наличием существенных контрастов электропроводности в области геотермального резервуара. Наблюдения велись с использованием аппаратуры Phoenix Geophysics MTU по сети 500x500 м и по сгущенной сети 250x250 м в центральной части площади месторождения. Суммарный объём магнитотеллурических наблюдений за период на рассматриваемой площади составил порядка 500 пунктов МТЗ.

Следует отметить, что район исследований характеризуется высоким уровнем электромагнитных шумов, связанных с работой Мутновской ГеоЭС и существенно влияющих на качество проводимых наблюдений. Использование технологии удаленной точки (remote reference) позволило повысить качество полученных данных в районе, непосредственно примыкающем к территории Мутновской ГеоЭС.

Анализ данных площадных наблюдений МТЗ выполнялся в различных пространственных масштабах, что было необходимым с точки зрения разделения эффектов влияния региональных геоэлектрических структур и локальных неоднородностей (целевого объекта). На основании результатов глубинных электромагнитных исследований Камчатского региона [Мороз, 1991] и общих представлений о тектоническом строении полуострова можно говорить о квазидвумерной региональной геоэлектрической структуре северо-восточного простирания. Близость регионально-продольных и регионально-поперечных кривых в диапазоне высоких частот свидетельствует о квазидномерной геоэлектрической структуре верхней части разреза, а характерное соотношение их низкочастотных ветвей типично для берегового эффекта [Мороз, 1991; Бердичевский и др., 1989].

Построение геоэлектрической модели разреза участка площадных исследований проводилось в несколько этапов. На первом этапе была выполнена одномерная 1D-инверсия квазипродольных кривых в короткопериодном диапазоне ($T < 1$ с), по результатам которой была получена модель верхней части разреза до глубины 1–1,5 км. Затем проводилась совместная двумерная инверсия регионально-продольных и регионально-поперечных кривых МТЗ по серии субпараллельных интерпретационных профилей юго-восточного простирания. Для учета берегового эффекта, модель начального приближения включала проводящую область (0,33 Ом·м) в краевой части, отвечающей воде и проводящим осадкам океана. Наконец, заключительным шагом явилось построение трехмерной геоэлектрической модели, основанной на результатах 2D-инверсии площадных данных, данных отдельных профилей, а также априорных представлениях о строении рассматриваемого региона. Характеризуя полученную геолого-геофизическую модель (рис. 1), необходимо остановиться на параметрах основных геоэлектрических горизонтов и структур, выделенных по результатам интерпретации. Верхняя часть модели (до абсолютных отметок – 1000 м), восстановленная наиболее надежно,

имеет выраженную трехслойную структуру. Основные резервуары гидротерм связаны с низкоомной толщей обводненных отложений алнейской серии.

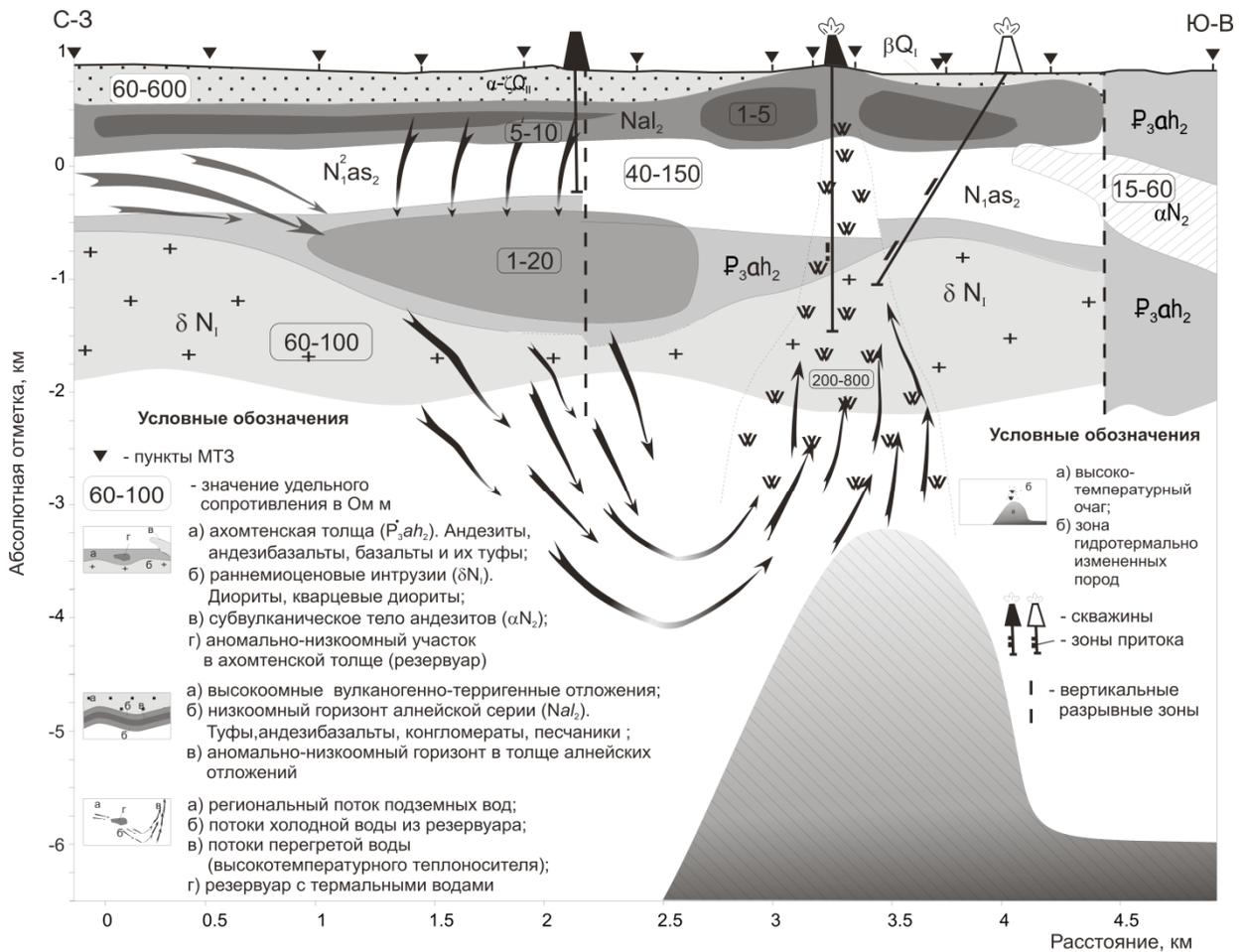


Рис. 7. Геолого-геофизическая модель Мутновского месторождения парогидротерм, построенная по результатам интерпретации данных МТЗ

Под низкоомной толщей обводненных отложений алнейской серии выделяется высокоомный горизонт (основание). Важным элементом построенной модели является контрастная аномалия повышенной электропроводности в высокоомном основании разреза. На абсолютных отметках порядка $-3,5...-4$ км в пределах высокоомного основания разреза отмечается подъем проводящего корового слоя с амплитудой 2–3 км.

Можно сделать вывод, что зоны трещиноватости, по которым происходит циркуляция высокотемпературного теплоносителя, как правило, не характеризуются аномальным понижением удельного сопротивления среды. Косвенным же признаком наличия глубинных зон разгрузки являются аномалии электропроводности, которые формируются в верхних горизонтах – в вулканогенно-терригенной толще пород. Не исключена ситуация, когда непосредственно под аномалией суммарной продольной проводимости, вследствие активной гидротермальной деятельности, вулканогенно-осадочный комплекс пород в зоне разгрузки может быть подвергнут активному гидротермальному метаморфизму – например, окварцеванию.

По результатам комплексной интерпретации геофизических материалов выделены зоны, рекомендованные для заложения разведочно-эксплуатационных скважин. Выявленные продуктивные зоны локализуются на периферии аномалии суммарной

проводимости отложений алнейской серии в зоне выступа корового проводника. Результаты проведенного бурения позволили получить прирост мощности в 10 МВт, что обеспечивает существенный вклад в мощность вновь вводимых очередей Мутновской ГеоЭС.

Библиографический список

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М. : Научный мир, 2009. – 680 с.
2. Бердичевский М.Н., Жданова О.Н., Жданов М.С. Глубинная геоэлектрика в океане. – М. : Наука, 1989. – 80 с.
3. Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. – Л. : Недра, 1991. – 184 с.
4. Нурмухамедов А.Г., Чернев И.И., Алексеев Д.А., Яковлев А.Г. Трехмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм // Физика Земли. – 2010. – № 9. – С. 15–26.
5. Окулесский Б.А., Порай-Кошиц А.М., Смирнов В.С., Нурмухамедов А.Г. Астеносфера по комплексу геофизических методов. – Киев : Наукова думка, 1988. – С. 72–83.
6. Спичак В.В. Магнитотеллурические поля в трехмерных моделях геоэлектрики. – М. : Научный мир, 1999. – 204 с.
7. Mackie R.L., Madden T.R. Conjugate direction relaxation solutions for 3D magnetotelluric modeling // Geophysics. – 1993. – Vol. 58. – № 7. – P 1052–1057.



УДК 550.372+550.837

В.В. Белявский^{^1}

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШАГОНАРСКОГО ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (АЛТАЕ-САЯНСКИЙ РЕГИОН)

Аннотация. Интерпретация магнитотеллурических данных, выполненная в режиме подбора 3D модельных кривых к экспериментальным, с учетом построений методов обменных волн землетрясений и глубинного сейсмического зондирования, позволила построить геоэлектрическую модель очаговой зоны землетрясений, охватывающей территорию Тувы. Оценена чувствительность кривых МТЗ к определению параметров коровых проводников и глубинных разломов. В результате оценено содержание связанной доли водного флюида в пределах Шагонарского очага землетрясений.

Ключевые слова: МТ-зондирование, 3D инверсия, разрешающая способность, импеданс, T.

Об авторах:

^{^1} ЦГЭМИ РАН ИФЗ им. О.Ю. Шмидта, Троицк, Россия.

V.V. Belyavskiy

GEOELECTRIC MODEL OF SAVONAROLA FOCUS EARTHQUAKES (THE ALTAI-SAYAN REGION)

Abstract. Interpretation of magnetotelluric data in selection mode 3D model curves to the experimental, given the build methods converted waves of earthquakes and deep seismic sounding data have allowed us to construct a geoelectrical model of focal zones of earthquakes covering the territory of Tuva. Sensitivity of MTS

curves to define the parameters of crustal conductors and deep fault has been estimated. As a result the content of the bound fraction of aqueous fluid within Signalscope of focus of earthquakes has been evaluated.

Keywords: magnetotelluric sounding, 3D inversion, resolution, impedance.

Шагонарская очаговая зона расположена в пределах широтной Тувинской складчатой системы, приурочена к юго-восточной границе Тувинской впадины и Шапшальско-Таннуольского и Восточно-Таннуольского поднятий (Тувинская и Восточно-Таннуольской СФЗ) (рис. 1). Она вытянута в северо-восточном направлении южнее Баш-Хемской рифтовой долины, лежащей на продолжении Байкальской рифтовой зоны. Размеры очаговой зоны составляют 100×50 км. Скорость восходящих движений Тувинской и Восточно-Таннуольской СФЗ превышает 1 мм/год, а нисходящих в Убусунурской и Тувинской впадинах до 0,5–0,7 мм/год. Основное количество землетрясений с $M = 2,5-5$ приурочено к границам впадин и поднятым блокам Шапшальско-Таннуольского массива [3].

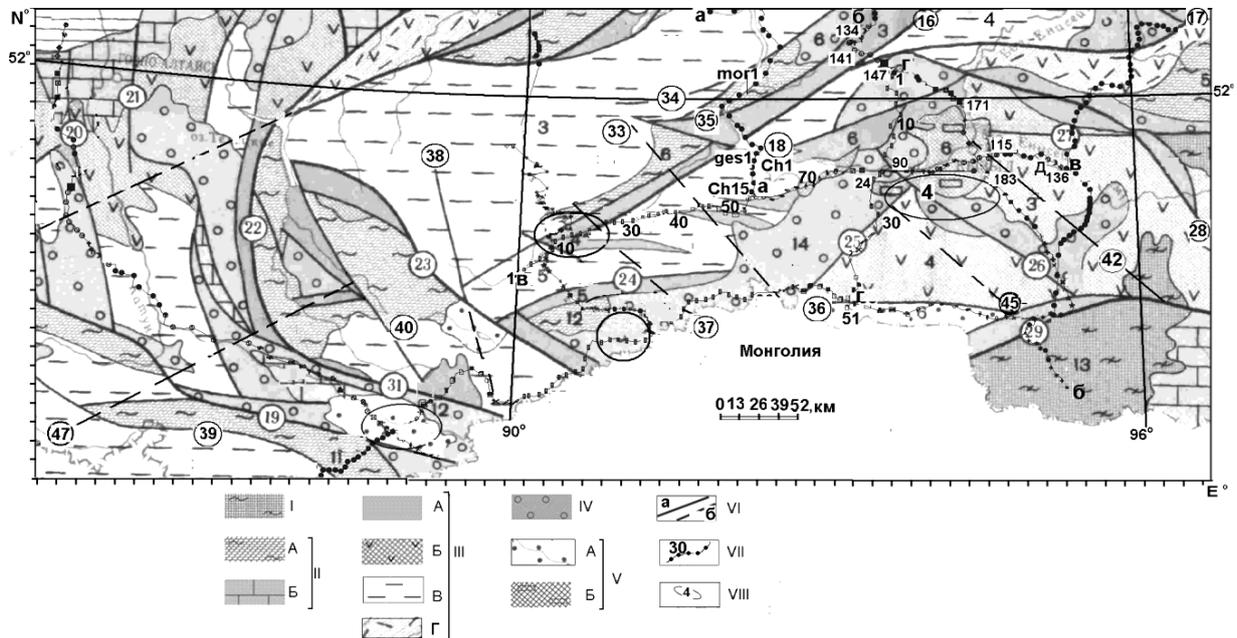


Рис. 6. Расположение профилей МТЗ на схеме структурно-геологического районирования [3].
 Условные обозначения: I – раннепротерозойские гнейсо-сланцевые и гнейсо-сланцево-карбонатные комплексы; II – структурно-формационные зоны (СФЗ) поздних протерозоид: А – Зеленосланцевые выступы байкалид; Б – терригенно-кремнисто-карбонатные чехлы массивов. III – СФЗ каледонид. А – раннекаледонские эвгеосинклиналильные с офиолитовыми ассоциациями: 3 – Куртушибинская; 6 – Аргалыкты-Бурская; эвгеосинклиналильного типа с: Б – базальто-андезитовыми, 3 – Ондум-Буреньская, 4 – Восточно-Таннуольская; В – базальт-риолитовыми ассоциациями, 4 – Систиг-Хемская, 5 – Хемчикская; Г – позднекаледонские миогеосинклиналильного типа: IV – СФЗ орогенной стадии, раннеорогенные вулканогенно-молассоидные, впадины: 6 – Усинская, 14 – Тувинская. V – Мезозойские (посторогенные активизации): А – Кайнозойские молассоидные впадины: 6 – Убусунурская. Б – Юрские молассоидные угленосные: 6 – Улуг-Хемская (Кызыльская впадина). VI – Глубинные разломы: 16 – Хемчикско-Куртушибинский, 17 – Азасский, 18 – Уюкский, 25 – Убусунур-Баянколький, 26 – Восточно-Таннуольский, 27 – Байсютский, 28 – Каа-Хемский, 33 – Карасуг-Улаятский, 35 – Усинский, 42 – Балыктыг-Хемский, 45 – Унгешский. VII – Точки МТЗ на профилях: а-а – Шушенское – Ак-Дурук, б-б – Можарка – Кызыл – Эрзин, в-в – Тээли – Сарыг-Сеп, г-г – Ак-Чарыз – Шивилинг, VIII – Очаговые зоны: 4 – Шагонарская

1. Методология 3D интерпретации кривых МТЗ

Перед магнитотеллурическими исследованиями стояли задачи на фоне электромагнитных полей, создаваемых неоднородностями верхней части разреза, определить параметры глубинных частей коры и разломов, секущих её. Алгоритм решения поставленной задачи включает: оценку размерности верхнего и нижнего структурных этажей, учета влияния «шумовой» части неоднородностей верхнего структурного этажа на кривые МТЗ путем их нормализации или построения максимальных кривых фазового тензора ρ^{faz2} , построение стартовых разрезов $\rho(H)$ по 1D инверсии максимальных ρ^{maxH} кривых индукции и ρ^{faz2} , оценку на 3D моделях разрешающей способности кривых МТЗ выделять проводящие блоки коры и информативности их 1D инверсии [1]. Расчет МТ полей выполнен по программам Друзкина и Книжнермана [2].

3D геоэлектрическая модель построена методом подбора к экспериментальным кривым ρ^{maxH} , ρ^{minH} и $argZ^{maxH}$ модельных по профилям МТЗ Можарка – Кызыл, Шивилинг – Ак-Чарыз и Тээли – Сарыг-Сеп (рис. 2, рис. 3). Сопоставление кривых ρ^{maxH} , ρ^{maxHM} для профиля Можарка – Кызыл дано на рис. 4. Относительные среднеарифметические погрешности подбора импедансов $|Z^{maxHM}|$ составляют на профилях: Можарка – Кызыл – $\delta^{maxH} = 26\%$, Шивилинг – Ак-Чарыз – $\delta^{maxH} = 25\%$ и Тээли – Сарыг-Сеп – $\delta^{maxH} = 17\%$. В усеченном диапазоне периодов они значительно уменьшаются.

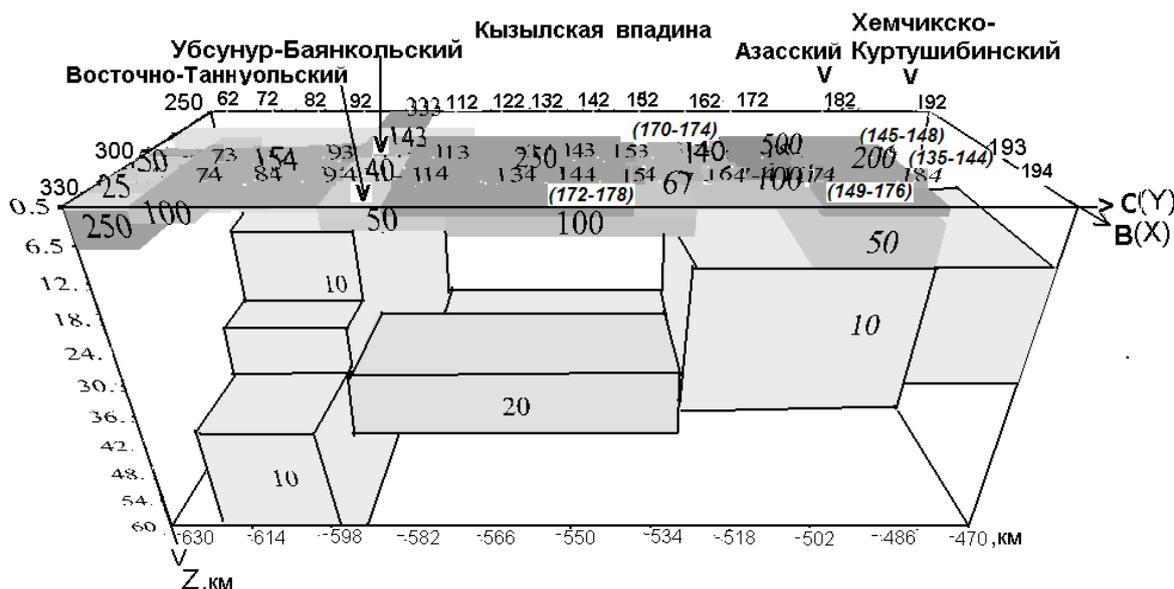


Рис. 7. Модель Шагонарского очага землетрясений. Вид с востока (пр. 4zy). На блоках – УЭС (широкие цифры), номера модельных т. н. и МТЗ (в скобках), сверху – названия разломов

Рассматриваемая часть Шагонарской очаговой зоны включает в себя СФЗ: Куртушибинскую (МТЗ 132 – 142), Тувинскую (МТЗ 147 – 174, МТЗ 1 – 30 и МТЗ 82 – 89), Улуг-Хемскую (МТЗ 174 – 180, МТЗ 100 – 114) и Ондум-Буренскую (МТЗ 180 – 185, 117 – 139)). Под Кызыльской впадиной мощностью высокоомной верхней части осадков достигает двух километров, низкоомной трех, а на глубине 30 км расположен блок мощностью 20–30 км с $\rho = 20$ Ом, протягивающийся с юга на север на 60 км (рис. 2–3).

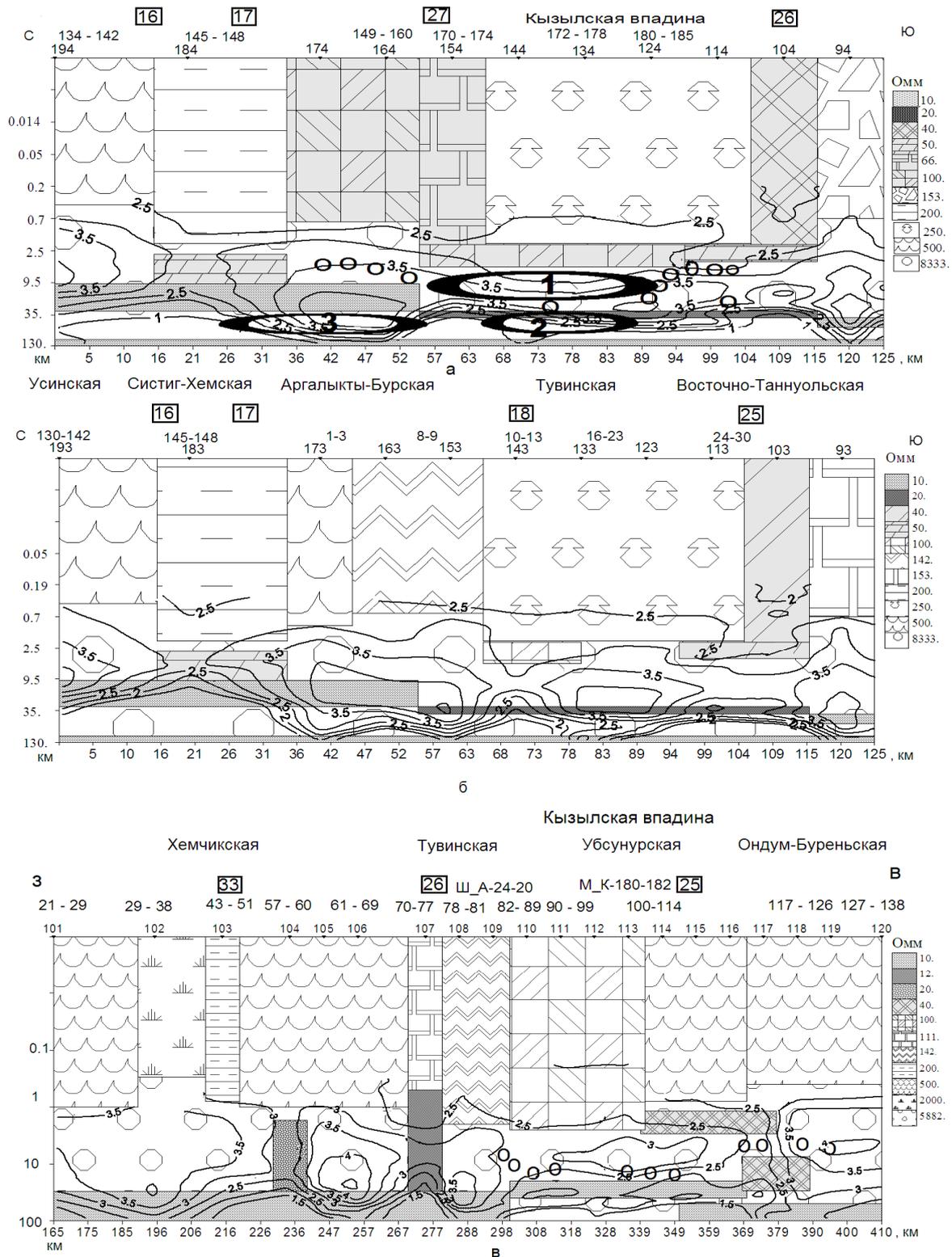


Рис. 8. Сечения 3-D моделей (а – б) и (в) по профилям: а – 4zy (пр. Можарка – Кызыл), б – 3zy (т. н. 93–193 и пр. Шивилинг – Ак-Чарыз), в – 10zx (пр. Тээли – Сарыг-Сеп) и разрезы $\rho(H)^M$ кривых $\rho_{\max H}^M$ в $\text{Igr}(\text{ОММ})$. Вышет. н. – номера МТЗ и разломы (в квадратах). Сверху названия СФЗ. Эллипсы – области пониженных скоростей V_p (ГСЗ). Кружки – гипоцентры землетрясений, выделенные МОВЗ (2002 г.) и ГСЗ (1986 г.). Ш_А 24-20, М_К 180 – 182 гг. МТЗ на пр. Шивилинг – Ак-Чарыз и Можарка – Кызыл). По оси У – масштаб логарифмический. Справа – шкала УЭС блоков

Севернее (МТЗ 134 – 160) в узле пересечения Азасского, Хемчикско-Куртушибинского, Усинского, Каа-Хемского и Уюкского разломов слой с $\rho = 10$ Омм воздымается к $H = 10$ км. Возможно, это зона влияния Баш-Хемской рифтовой системы, которая проявляется повышенной сейсмичностью и низкоскоростной нижней корой. Проводящие блоки в зоне влияния Азасского и Балыктыг-Хемского глубинных разломов приближены к дневной поверхности до $H = 2,5$ км, где их $\rho = 40$ Омм (рис. 2–3). Юго-восточнее Кызылской впадины проводники расположены на глубинах 35–45 км. Южнее и севернее очаговой зоны они погружаются до $H = 40–50$ км. В ее пределах, восточнее и севернее Кызылской впадины на глубине 30 км $T > 600^{\circ}$ С, а на границе Мохо (50–55 км) $T > 800^{\circ}$ достаточной для дегидратации пород.

Из рис. 3 видно, что 1D инверсии кривых $\rho^{\max HM}$ позволяет картировать проводники, но для восстановления параметров разреза необходимо выполнять 3D инверсию. Оценка разрешающей способности кривых показала, что решение обратной задачи методом подбора 3D кривых $\rho^{\max HM}$ к $\rho^{\max H}$ позволяет приближенно оценить глубину разлома, наличие его контакта с блоками, расположенными вблизи и его УЭС [1]. Глубина до проводников в нижнем структурном этаже и их УЭС определяется со значительной погрешностью.

Согласно томографической модели вдоль профиля «Кварц», кора и верхняя мантия под Кызылской впадиной Шагонарского очага характеризуется понижением скорости продольных волн V_p на 2–3 %. Юго-восточнее впадины и под ней проводники, расположенные на глубинах 35–45 км, совпадают с зоной пониженных $V_p = 6,75$ км/с (рис. 3). Связанная часть флюида, определенная при $C = 10$ г/л, составляет $\phi_p = 0,25–0,3$ %, а полная, определенная по дефициту скорости продольных волн, $\phi_p = 1,2–1,5$ % [1]. Проводящие блоки на $H = 10$ км расположены вблизи кровли волновода с $V_p = 6,05$ км/с – $\phi_p = 0,5–2$ % и $\phi_p = 0,5$ %. Доля связанного флюида в горной породе на $H > 35–45$ км не превышает 20–25 % от полной массы, а на $H = 10–20$ км она возрастает до 40–100 %.

Результаты

1. Согласование границ проводящих блоков с доменами пониженных скоростей V_p , зонами смены корреляции сейсмических волн, повышенного поглощения сейсмических волн позволяет стабилизировать решение обратной 3-D задачи МТЗ. Глубины до разломов и проводников, расположенных в верхней и средней частях коры, определяются с погрешностью, превышающей относительную погрешность подбора $Z^{\max HM} - \delta^{\max H} = 10 - 15$ %. УЭС и глубина до проводников нижних частей коры вычисляются с погрешностью, превышающей 100 %, как и их флюидонасыщенность. Но выводы о пределах изменения связанной доли флюида полезны для оценки проницаемости коры, так как их различия для структурных единиц достигают двух порядков.

2. Максимальными $\phi_p = 0,5–1,5$ % характеризуются глубинные разломы на южном борту Центрально-Тувинского прогиба и на пересечении Курайского, Азасского, Каа-Хемского и Хемчикско-Куртушибинского разломов. Высокое содержание флюида свойственно и разломам субмеридионального и северо-западного направлений (Восточно-Таннуольский, Унгешский). Гипоцентры землетрясений концентрируются как вблизи глубинных разломов с $\rho = 200–300$ Омм (северная ветвь Хемчикско-Куртушибинского), так и с $\rho = 10–100$ Омм (южная ветвь Хемчикско-Куртушибинского, Уюкский, Балыктыг-Хемский, Азасский и Байсютский). Низкие ρ коры обусловлены ее раздробленностью глубинными разломами. Об этом свидетельствует близость их к зонам повышенного поглощения обменных волн и пони-

женного теплового потока. Вдоль этих разломов восходящие движения составляют 1–1,6 мм/год, а на ограничивающих ими впадинах наблюдаются и разнонаправленные перемещения.

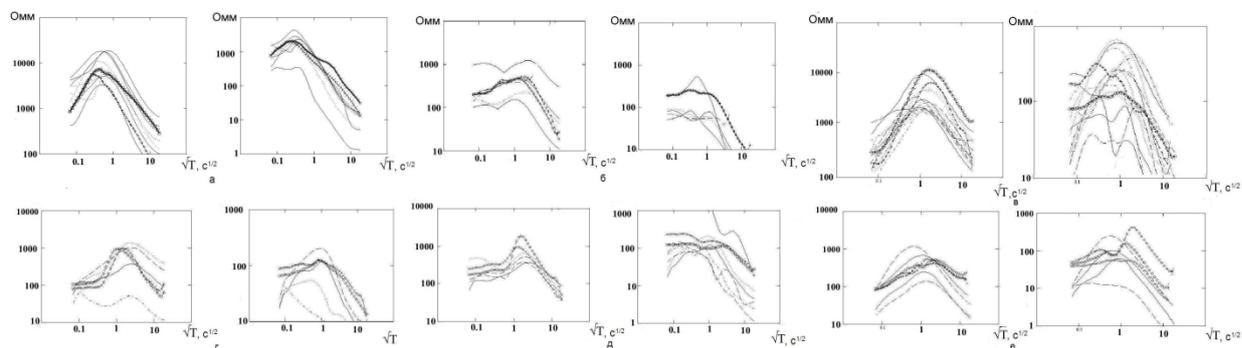


Рис. 9. Сопоставление модельных (широкие линии) и экспериментальных (тонкие линии) кривых $\rho^{\max II}$ (левая карта), $\rho^{\min II}$ (правая карта) на профиле Можарка – Кызыл в т. МТЗ: а – 134–142 (т. н. 193–194), б – 145–148 (т. н. 184–183), в – 149–170 (т. н. 174), г – 170–174 (т. н. 154–155), д – 172–178 (т. н. 135–144), е – 180 – 184 (т. н. 105–116). Масштаб билогарифмический

3. В очаговых зонах землетрясений на глубине 10–20 км УЭС уменьшается до 10–20 Ом·м, что свидетельствует о наполнении коры связанным флюидом с $\Phi_p = 0,5–1,5 \%$. За их пределами проводящие блоки расположены глубже 40 км с $\Phi_p = 0,3–0,4 \%$ (рис. 3), Основная часть землетрясений расположена на глубинах до 15–20 км выше или вблизи кровли этих проводящих блоков. Это свидетельствует о том, что флюидонасыщенные пласты гасят пластовое напряжение.

Согласно данным метода МОВЗ и ГСЗ, под очаговыми зонами и выше границы Мохо кора характеризуется повышенной трещиноватостью.

4. Восточно-Тувинский, Убсунурский прогибы с максимальным содержанием связанного флюида в коре находятся в режиме субширотного горизонтального растяжения, в отличие от горных хребтов и поднятий. Возможно, это связано с внутрикоровыми и мантийными движениями, способствующими поступлению флюида в верхние слои коры (Ребецкий и др., 2013). На Батеневском, Мрасском и Сангиленском устойчивых массивах проводящие разломы имеют УЭС, значительно превышающие те, что получены в данной очаговой зоне [1].

Библиографический список

1. *Белявский В.В.* Геоэлектрическая модель Алтае-Саянской кладчатой области. Часть I и часть II. LAP-LAMBERT. Academic Publishing. Saarbrucken, Deutschland. 2014. ISBN: 978-3659-39322-8, ISBN: 978-3659-52219-2.
2. *Друскин В.Л., Книжнерман Л.А.* Спектральный полудискретный метод для численного решения трехмерных нестационарных задач в электроразведке // Известия Акад. Наук СССР. Физика Земли. – 1988. – № 8. – С. 63–74.
3. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. Алтае-Саянский регион и Забайкальско-Верхнеамурский регионы. Кн.1. Сб. научных трудов. М-во геологии СССР. Всесоюзный научно-исследовательский геол. Ин-т ; под ред. П.С. Матросова, Г.Н. Шапошникова. Министерство геологии СССР. – Л. : Недра, 1988. – 299 с.



УДК 550.83:553.81(571.56)

С.Ф. Бессмертный^{^1}

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЛОЩАДЕЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ КИМБЕРЛИТОПРОЯВЛЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИМИ ЗОНДИРОВАНИЯМИ

Аннотация. Кимберлитовые поля являются продуктом сложных геологических и физико-химических процессов и представляют собой крупные структурно-вещественные неоднородности консолидированной коры. Региональные работы GMTЗ, проведенные на территории ЯАП, позволили определить критерии прогнозирования кимберлитовых проявлений, к которым относится наличие сквозькоровых проводящих неоднородностей под кимберлитовыми полями на фоне высокоомного разреза, что послужило основанием для включения МТЗ в геолого-поисковый комплекс АК «АЛРОСА».

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, земная кора, кимберлитовое поле, геофизические методы, магнитотеллурические зондирования, кажущееся сопротивление, проводимость.

Об авторах:

^{^1} Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА».

S.F. Bessmertny

PREDICTION OF SPACE IN THE CONTAINMENT CYBERLITERATURE YAKUT DIAMONDIFEROUS PROVINCE BASED ON RESEARCH GEOELECTRIC STRUCTURE OF THE CRUST OF THE MAGNETOTELLURIC SOUNDING

Annotation. Kimberlite fields are a product of complex geological and physical-chemical processes and are major structural and material heterogeneity of the crust. Regional GMTZ work carried out on the territory of the YDP allowed to define criteria predicting kimberlite manifestations, which include the presence of conductive "skvozkorovyh" irregularities under the kimberlite fields on the background of high resistance section, which served as the basis for inclusion in the MTP prospecting complex "ALROSA".

Keywords: Yakut diamondiferous province, the earth's crust, kimberlite field, geophysical methods, magnetotelluric sounding, apparent resistivity, conductivity.

Изучение особенностей строения земной коры в районах продуктивных (алмазоносных) кимберлитовых полей для определения глубинных прогнозных признаков этих объектов с целью последующей локализации площадей, перспективных на обнаружение новых проявлений кимберлитового магматизма на территории Сибирской платформы, является актуальной проблемой геолого-поискового комплекса АК «АЛРОСА». Геофизические методы (грави- и магнитометрия, сейсморазведка и электроразведка) в геологической отрасли относятся к технологиям, обеспечивающим дистанционное изучение земных недр посредством регистрации физических полей на поверхности Земли. В результате последующей интерпретации наблюдаемых физических величин появля-

ется возможность получить информацию о строении глубинных структурно-вещественных комплексов кристаллической коры, недоступных геологам для непосредственного исследования в настоящее время.

В Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) консолидированная земная кора мощностью 34–58 км в основном перекрыта горизонтально-слоистыми образованиями осадочного чехла мощностью 2 км и более. Кимберлитопроявления ранга трубка, куст сближенных тел, кимберлитовое поле выделяются в горизонтально-слоистой структуре платформенного чехла как неоднородные объекты. По современным представлениям, кимберлитовая магма формировалась в верхней мантии и более глубоких слоях планеты. Ее проникновение через консолидированную кору от границы Мохоровичича к подошве образований платформенного чехла должно происходить по ослабленным проницаемым зонам. Проницаемые зоны консолидированной коры, как и кимберлитопроявления в образованиях платформенного чехла, являются гетерогенными объектами. В процессе поиска алмазных месторождений в ЯАП проведены региональные комплексные геофизические наблюдения методами глубинного сейсмического (ГСЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ), грави- и магнитометрические съемки, направленные на выделение гетерогенных зон в земной коре. При интерпретации материалов этих исследований установлено, что для алмазоносных кимберлитовых полей Якутии характерна неоднородность консолидированной коры. Аномальные свойства подобных областей в геофизических полях проявлены низкоградиентными локальными магнитными и гравитационными минимумами амплитудой 20–80 нТл и 1–3 мГл соответственно, наличием многочисленных разноориентированных осей синфазности волнового поля и субвертикальными проводящими зонами на фоне пород с высоким электрическим сопротивлением. По данным физико-геологического моделирования, на участках проявления кимберлитов земная кора преобразована в процессе эволюции кимберлитовых магм на этапе среднепалеозойской тектоно-магматической активизации. Вероятно, под воздействием флюидно-магматической системы с повышенными P-T параметрами формировались гетерогенные субвертикальные зоны, характеризующиеся неравномерным распределением вещества и, как следствие, вариациями физических свойств слагающих их породных ассоциаций. Такие таксоны отличаются аномальными петрофизическими характеристиками, поэтому проявляются в геофизических полях. Однако вследствие мелкого масштаба сети наблюдений и низкой разрешающей способности региональных исследований, при интерпретации, как правило, не удается достаточно надежно восстановить особенности строения аномальных транскоровых зон. Более надежную информацию об этом может дать моделирование геоэлектрических свойств разреза консолидированной коры на основе материалов среднемасштабных профильных и площадных МТЗ. Этот вид зондирования является наиболее дешевым, мобильным и экологически безопасным. Для него достаточно полно, по сравнению с другими методами на переменном токе, разработано теоретическое обоснование.

В 2002 году Якутским научно-исследовательским геологическим предприятием (ЯНИГП ЦНИГРИ), в настоящее время НИГП АК «АЛРОСА», начаты среднемасштабные работы МТЗ. Целевым назначением исследований являлось изучение особенностей глубинного геоэлектрического разреза алмазоносных кимберлитовых полей, а также прогноз и выявление промежуточных поисковых объектов в ранге кимберлитового поля и куста кимберлитовых тел на лицензионных площадях геологоразведочных экспедиций Компании. Результаты региональных работ МТЗ, проведенных на территории ЯАП различными организациями, показали [1], что районы кимберлитового магматизма, включая кимберлитовые поля, пространственно приурочены к высокоомным блокам земной коры (рис. 1). Высоким сопротивлением обычно обладают области, отно-

сящиеся к древним стабильным блокам [2]. С другой стороны, приуроченность проявлений алмазоносных кимберлитов к древним кратонам, не подвергавшимся существенной тектоно-магматической активизации на протяжении последующих докимберлитовых этапов развития, объясняется известным «правилом Клиффорда» [3]. Области древней кратонизации сложены породами земной коры, сформировавшимися около 3 млрд лет назад и претерпевшими на рубеже 1,8–1,9 млрд лет метаморфизм в гранулитовой фации [4]. В дальнейшем на протяжении последующей эволюции земная кора таких областей существенных преобразований не испытывала. В настоящее время она характеризуется низким тепловым потоком 20–25 мВт/м² (300 °С на уровне границы Мохоровичича и 200 °С на глубине 20 км), низкой проводимостью пород, её слагающих. Одним из геофизических критериев прогнозирования кимберлитовых проявлений служит наличие проводящей субвертикальной неоднородности под кимберлитовыми полями на фоне высокоомного разреза, характеризующего древний стабильный блок.

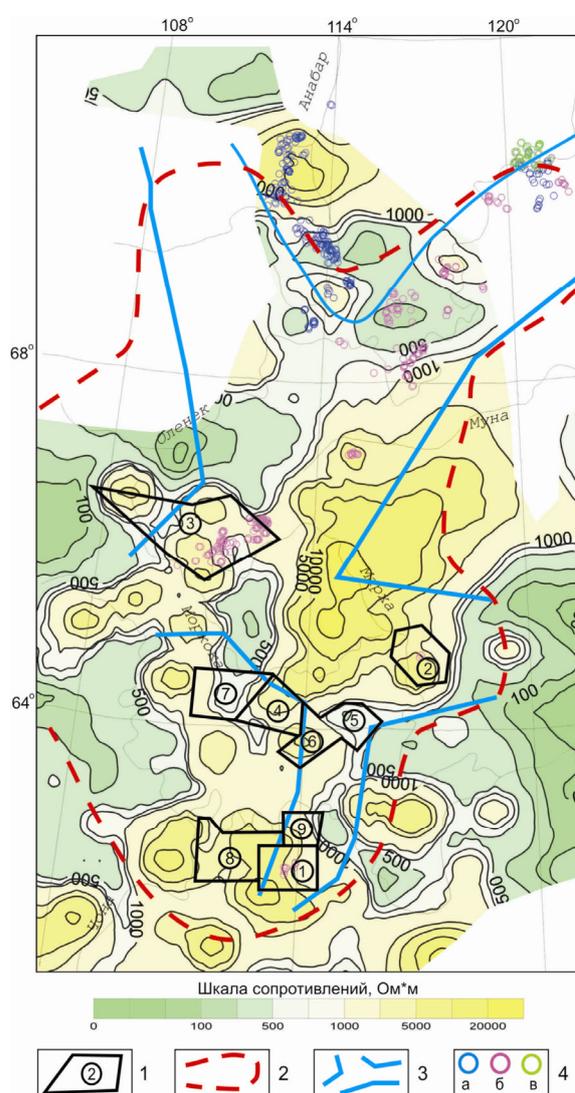


Рис. 8. Карта распределения сопротивлений пород земной коры ЯАП на глубине 20 км по данным региональных работ МТЗ [1]:

1 – участки среднemasштабных площадных работ МТЗ: 1 – Мирнинское кимберлитовое поле, 2 – Среднемархинский алмазоносный район, 3 – Далдыно-Алакитский алмазоносный район, 4 – объект Алымджа-Моркокинский (восточный) (АМГРЭ), 5 – объект Правобережный (БГРЭ), 6 – объект Хампинский (БГРЭ), 7 – объект Алымджа-Моркокинский (западный) (АМГРЭ), 8 – объект Ботубинский (БГРЭ), 9 – Бахчинская площадь; 2 – границы литосферного корня [2]; 3 – область максимальной мощности литосферы [1]; 4 – кимберлитовые трубки: а – мезозойские, б – палеозойские, в – неуставленного возраста

На территории Мирнинского кимберлитового поля в опытно-производственном режиме реализованы площадные МТЗ в 2002–2004 гг. В результате исследований изучено строение земной коры до глубин 40–50 км, исследована связь кимберлитового магматизма с особенностями геоэлектрического разреза. Консолидированная кора

древних стабильных блоков, отвечающая антеклизам, обладает высоким сопротивлением. В пределах областей высокого сопротивления зафиксированы участки повышенной проводимости, соответствующие зонам высокой проницаемости. Области протерозойской тектоно-магматической активизации (прогибы, впадины) отличаются от стабильных архейских блоков общим повышением проводимости пород в интервале земной коры, при этом превышая по уровню сопротивлений проницаемые зоны. Мирнинское кимберлитовое поле находится в узле сочленения двух систем разломов – Вилуйско-Мархинской и Укугутской и, по данным геоэлектрики, выделяется аномалиями проницаемости земной коры. Кимберлитовые тела района приурочены к разломам Вилуйско-Мархинской системы, проходящим по участкам соприкосновения высокоомных блоков коры с аномальными зонами проводимости, находясь на глубинах 15–25 км в градиентных зонах или внутри последних, что следует из рассмотрения геоэлектрического разреза 2D-инверсии по профилю 28, пересекающему кимберлитовую жилу Ан-21 (рис. 2).

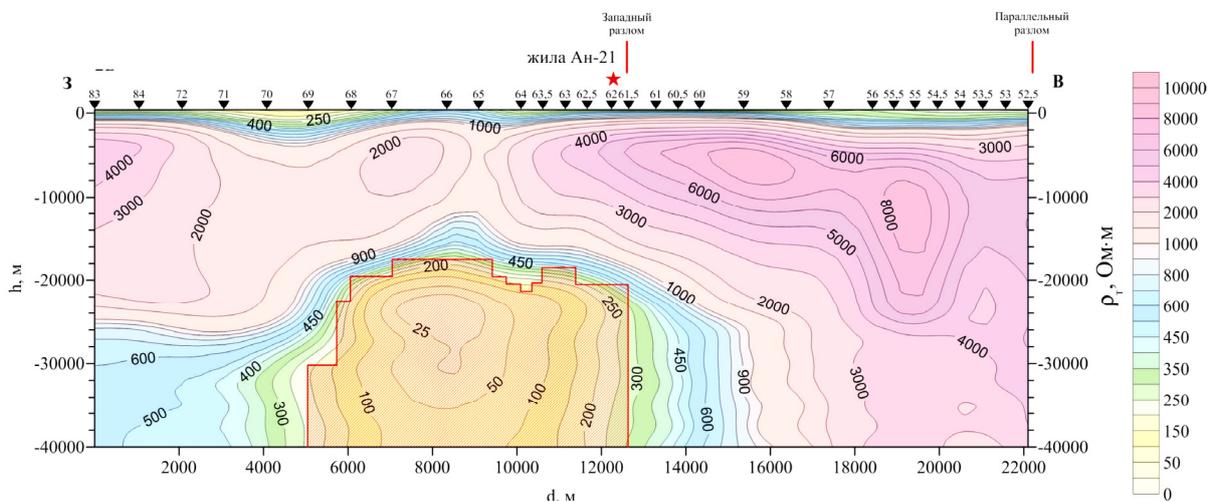


Рис. 9. Геоэлектрический разрез 2D-инверсии по профилю 28

Среднемасштабные работы МТЗ в площадном варианте выполнены в 2005–2009 гг. в Среднемархинском алмазодобывающем районе. В блоке высокого сопротивления земной коры локализованы коровые проводящие неоднородности. Установлено, что их корневые части уходят в мантию. К одной из зон высокой проводимости, верхняя кромка которой зафиксирована в диапазоне глубин 10–12 км, приурочен куст кимберлитовых трубок Ботубинская и Нюрбинская, тел Мархинское и Майское Накынского кимберлитового поля. Участки выделенных неоднородностей как в Мало-Ботубинском, так и в Среднемархинском районах учитываются Ботубинской геологоразведочной экспедицией при планировании крупномасштабных геолого-поисковых работ.

В Далдыно-Алакитском алмазодобывающем районе работы МТЗ, выполненные в 2006–2008 гг. по относительно редкой сети профилей, также показали наличие мощных сквозькоровых проводящих неоднородностей, в пределах которых локализуются кимберлитовые тела района. Достаточно сложное строение проводящих зон привело к разделению неоднородностей на разнопорядковые. На глубинах 18–20 км прослеживаются верхние кромки массивных низкоомных областей первого порядка – ширина неоднородностей по профилю наблюдений достигает 20–30 км, соизмеримых с границами кимберлитовых полей. От нижнекоровых аномальных зон к основанию осадочного чехла картируются неоднородности второго порядка с верхними кромками на глубинах 4–6 км. Углы наклона плоскостей, ограничивающих неоднородности в верхних частях

коры, составляют примерно 70°, ширина неоднородностей по профилю наблюдений 5–7 км соответствует кустам тел.

С учетом вышеизложенных факторов локализации известных проявлений кимберлитов МТЗ включены в геологоразведочный комплекс АК «АЛРОСА» как прогнозный глубинный метод на мелко- и среднемасштабных стадиях алмазопромышленных работ. Аномальные геоэлектрические характеристики в комплексе с другими благоприятными факторами используются в качестве прогнозного критерия поисковых объектов в ранге кимберлитового поля, куста сближенных тел. В настоящее время среднемасштабные площадные исследования МТЗ силами НИГП реализуются на поисковых площадях текущих объектов экспедиций Компании для изучения глубинного строения территории. В результате проводимых работ определяются основные черты глубинной электропроводности кристаллической коры. При интерпретации МТ-кривых полученные параметрические модели 2D-инверсии используются для построения карт распределения сопротивлений на глубинах 40, 30, 20, 15 и 10 км. Оптимальными срезами для выделения локальных проводящих неоднородностей, которые, возможно, связаны с кимберлитовым магматизмом, являются уровни 20 и 15 км. На них с одинаковой контрастностью проявляются как региональные, так и локальные особенности геоэлектрической структуры площадей. Это позволяет локализовать проводящие зоны, в пределах которых сопротивление составляет 10–200 Ом*м. В геоэлектрическом разрезе выделенные зоны могут отличаться различными сопротивлениями и формой, но должны иметь сквозной характер (корни уходят в мантию) и располагаться выше литосферного проводящего слоя.

В качестве примера локализации площадей под постановку крупномасштабных геолого-геофизических исследований по результатам работ МТЗ на рисунке 3 приведен срез кажущихся сопротивлений на гипсометрическом уровне 20 км, охватывающий территорию целого ряда завершенных и действующих объектов Ботуобинской (БГРЭ) и Амакинской (АмГРЭ) экспедиций АК «АЛРОСА».

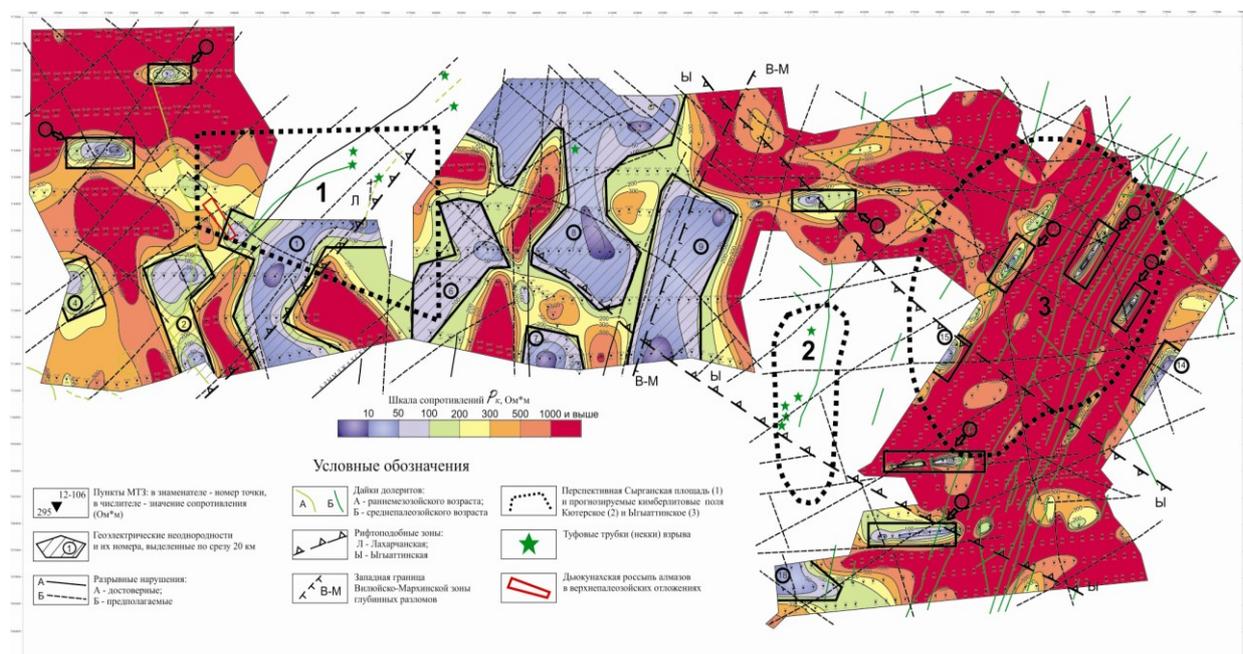


Рис. 10. Карта распределения сопротивлений на глубине 20 км
(объекты: Алымджа-Моркокинский (западный) – 7, Алымджа-Моркокинский (восточный) – 4, Правобережный – 5, Хампинский – 6)
Цифры – номера участков на рисунке 1

Библиографический список

1. Манаков А.В., Романов Н.И., Полторацкая О.Л. Кимберлитовые поля Якутии. – Воронеж : Воронежский госуниверситет, 2000. – 82 с.
2. Манаков А.В. Глубинные геофизические критерии коренной алмазоносности (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // Диссертация на соискание ученой степени д. г.-м. н. – Якутск : ИГАиБМ, 2002 – 278 с.
3. Clifford T.N. Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa // Earth. Planet. Sci. Lett. – 1966. – V. 1. – P. 421–434.
4. Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Сибирский кратон: формирование, алмазоносность. – М. : изд-во РОБОНРИ, Новый мир, 2006.– 212 с.



УДК 550.834

И.В. Буддо^{^1}, Н.В. Мисюркеева^{^1}, А.И. Ильин^{^1}, Ю.А. Агафонов^{^1}, А.В. Поспеев^{^2}СТАДИЙНОСТЬ ПОСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ
НА ПРИМЕРЕ КОВЫКТИНСКОГО ГКМ

Аннотация. В работе представлен и научно проанализирован опыт использования нестационарных электромагнитных зондирований (метода зондирований становлением поля в ближней зоне) на Ковыктинском ГКМ. Рассмотрена стадийность изучения месторождения электроразведкой и представлены основные геологические результаты работ.

Ключевые слова: электроразведка ЗСБ, Ковыктинское ГКМ, аномально высокие пластовые давления, коллекторские свойства.

Об авторах:

^{^1} Иркутское электроразведочное предприятие, Иркутск.

^{^2} Институт Земной зоры СО РАН, Иркутск.

I.V. Buddo, N.V. Misyurkeeva, A.I. Ilyin, Yu.A. Agafonov, A.V. Pospseev

SEQUENCE OF KOVYKTA GAS FIELD INVESTIGATIONS WITH
ELECTROMAGNETICS

Abstract. The abstract describes experience of transient electromagnetic technique (TEM) application for Kovykta Gas-condensate field exploration. The sequence of TEM for field exploration are presented. The main general geologic results are shown.

Keywords: transient electromagnetic method TEM, Kovykta Gas-condensate field, abnormally high pore pressure, reservoir properties.

Введение

Ковыктинское газоконденсатное месторождение (КГКМ) является одной из важнейших кладовых углеводородного сырья не только в Восточной Сибири, но и в Рос-

сии. Однако, несмотря на относительно удобное географическое положение, КГКМ характеризуется сложными орогидрографическими и геологическими условиями. В тектоническом плане месторождение окружено протяженными валами, в пределах которых за счет соляного тектогенеза произошла серьезная перестройка пород карбонатно-галогенного комплекса. Одной из существенных проблем, встреченных при разведке КГКМ, является существование рапоносных зон, встреченных в карбонатных породах ангарской, бельской и верхов усольской свит. Необходимость перекрытия рапопроявляющих горизонтов приводит к серьезным потерям диаметра бурового ствола, причем даже использование тяжелой конструкции скважин не дает гарантии успешного безаварийного вскрытия подсолевых отложений.

Изучение Ковыктинского ГКМ одним лишь методом – сейсморазведкой – сопряжено с рядом трудностей, среди которых тонкая слоистость разреза в интервале перспективного парфеновского горизонта, литологические замещения пластов, мощная тектоника, осложняющая верхнюю часть разреза, высокие значения пластовых скоростей, чрезвычайно изрезанный рельеф [2].

Электроразведка на Ковыктинском ГКМ

В данной работе представлен и научно проанализирован опыт использования нестационарных электромагнитных зондирований (метода ЗСБ) на КГКМ. Показано, что в условиях Сибирской платформы, несмотря на огромную величину поперечного сопротивления карбонатно-галогенного экрана, существует принципиальная возможность высокоточного картирования проводящих горизонтов осадочного чехла. Как правило, удается оценивать параметры до 10 отдельных геоэлектрических горизонтов с погрешностью не более 0,1–0,5 см. Важнейшей петрофизической предпосылкой, обеспечивающей геологическую эффективность электромагнитных зондирований, является тесная зависимость проводимости горных пород нижнепалеозойского возраста от их коллекторских свойств. В силу этого, применение метода ЗСБ с целью прогноза распространения коллекторов в породах подсолевого и карбонатно-галогенного комплексов на юге Сибирской платформы позволило значительно повысить надежность нефтегазописковых исследований.

КГКМ представляет собой прекрасную иллюстрацию стадийности постановки электроразведочных работ. В период 1994–2002 гг. на КГКМ проведены работы методами ЗСБ и ЧЗ-ВП по сети сейсморазведочных профилей, а также на площадках ряда скважин, в т. ч. в районе участка опытно-промышленной эксплуатации. Необходимо отметить, что с 1999 г. работы ЗСБ проводились с использованием современной цифровой телеметрической аппаратуры SGS-TEM, что позволило существенно повысить качество полевых материалов, а соответственно, и геологическую информативность исследований [3]. По результатам интерпретации материалов ЗСБ в разрезе осадочного чехла выделены проводящие горизонты, которые связываются с развитием пластов-коллекторов в интервалах литвинцевской, ангарской свиты, бельско-булайского и подсолевого комплексов. Кроме того, сделан прогноз наличия зон, неблагоприятных для проходки скважин [1]. Оценены перспективы газоносности подсолевого комплекса.

В 2001–2011 гг. работы ЗСБ были проведены на соседних Хандинском, Чиканском и Южно-Усть-Кутском ЛУ, а в 2012 г. продолжены на Ковыктинском ЛУ. Всего за период 1999–2014 гг. на Ковыктинском и прилегающих участках было выполнено 4182 зондирований ЗСБ.

В 2015 г. были выполнены работы по переинтерпретации и обобщению всех полученных материалов ЗСБ, по результатам которой, с привлечением результатов 2D сейсморазведки и бурения, построена региональная геоэлектрическая модель Ковыктинской зоны (рис. 1).

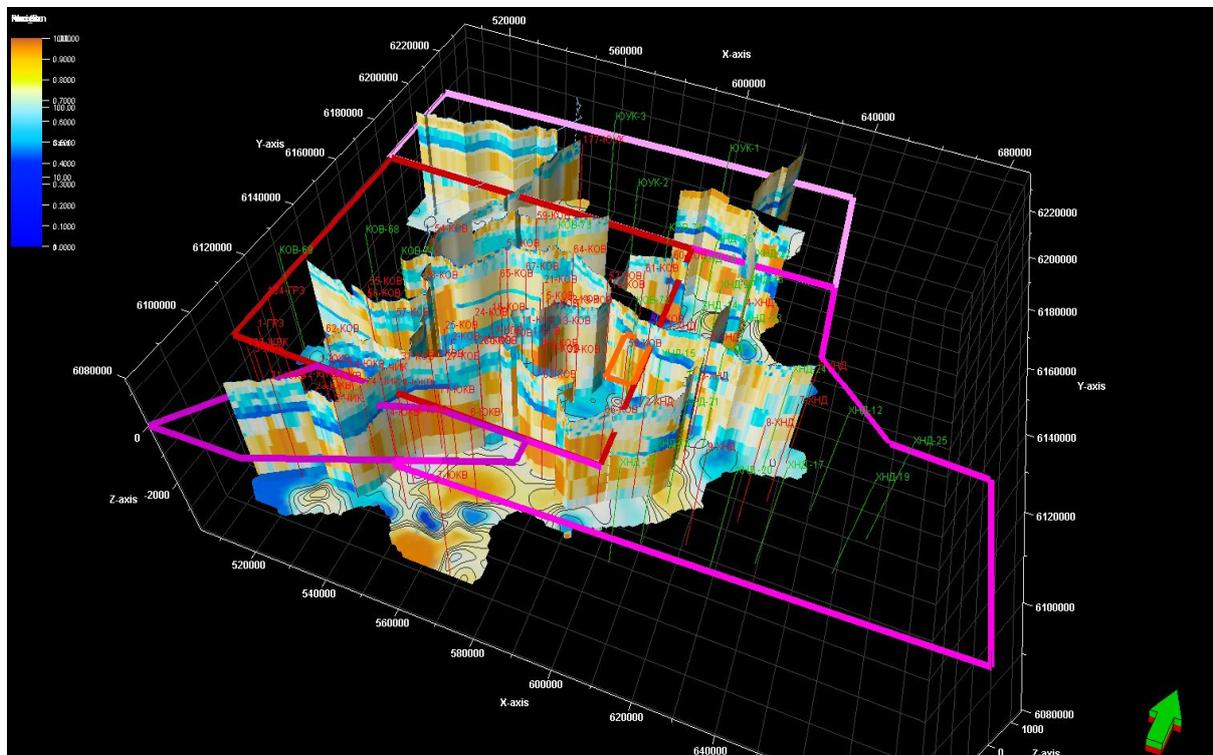


Рис. 11. Региональная геоэлектрическая модель Ковыктинской зоны

Кроме проведения профильных работ ЗСБ, исследования выполнялись на площадках проектных разведочных скважин. Так, в период 2013 – 2015 гг. исследования ЗСБ были проведены на площадках шести скважин. В ходе проведения исследований отработана и научно обоснована методика оценки горно-геологических условий проходки скважин (картирование зон возможных поглощений бурового раствора и АВПД), а также прогноза газоносности интервала нижнемотской подсыты (парфеновского горизонта-коллектора). По результатам последующего бурения подтверждена высокая достоверность прогноза условий бурения и перспектив газоносности по ЗСБ.

В 2014–2015 гг. в пределах КГКМ были проведены первые опытно-методические работы 3D ЗСБ в объеме 100 км² по плотной сети наблюдений. Примечательно, что исследования производились в двух модификациях: малоглубинных и глубоких ЗСБ. В первом случае изучалась верхняя часть разреза (ВЧР) до глубины 300–500 м, во втором – до 3500 м, вплоть до поверхности фундамента. При этом решался широкий спектр геологических задач: картирование водоносных горизонтов ВЧР, тектонических нарушений, прогнозирование горно-геологических условий бурения и перспектив газоносности парфеновского горизонта.

На следующем этапе – эксплуатационном – целесообразно проведение площадных работ ЗСБ на площадках глубоких скважин для оценки условий проходки, а также малоглубинных МЗСБ – с целью поиска грунтовых вод для обеспечения процесса бурения.

Выводы

Таким образом, Ковыктинское ГКМ представляет собой пример системного исследования месторождения электроразведкой на всех стадиях геологоразведочного процесса: от поискового, разведочного этапов до эксплуатационного. По результатам исследований научно обоснована методика прогноза горно-геологических условий бурения, а также сформированы характерные геоэлектрические модели, объясняющие связь геоэлектрических свойств пород и их коллекторских свойств. Представляется, что данный подход является весьма эффективным, что в конечном итоге позволит снизить риски непродуктивного бурения и скорректировать затраты на разработку месторождения.

Библиографический список

1. Агафонов Ю.А., Вахромеев А.Г. Новые геолого-геофизические подходы в прогнозе зон АВПД на примере Орленгской структурной седловины // Четвертая Байкальская молодежная школа-семинар «Геофизика на пороге третьего тысячелетия»: сб. трудов. – Иркутск: ИрГТУ, 2004. – С. 59–69.
2. Агафонов Ю.А., Кондратьев В.А., Ольховик Е.А., Пашиевин А.М., Поснеев А.В. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы // Разведка и охрана недр. – 2004. – № 8–9. – С. 26–28.
3. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-ТЕМ и FastSnap. Эффективность и опыт использования. Журнал «Приборы и системы разведочной геофизики» № 01(31)/2010. – Саратов, 2010. – С. 20–24.



УДК 550.837

А.Б. Великин¹, А.А. Великин¹

НОВЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛАМИ СТЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕДР ПРИ ПОИСКАХ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. Представлены новый корреляционный метод импульсной электроразведки со специальными шумоподобными сигналами СТЕМ (с повышенной глубинностью и разрешающей способностью) для электромагнитного зондирования при поисках углеводородного сырья, а также экспериментальный образец программно-аппаратурного комплекса СТЕМ-1, опробованные в полевых условиях в Калужской области, в Красноярском крае и в Иркутской области в 2012–2014 гг.

Приведены сравнительные оценки глубинности и разрешающей способности метода СТЕМ с комплексом СТЕМ-1 и традиционного метода зондирования становлением поля ЗСБ с электроразведочной системой Цикл-7 путем измерений на физических моделях и математического моделирования.

Результаты полевого опробования метода СТЕМ и комплекса СТЕМ-1 приводятся в тезисах, посвященных этому опробованию.

Ключевые слова: импульсная электроразведка, шумоподобные сигналы, псевдослучайная бинарная последовательность (ПСБП), ЗСБ.

Об авторах:

¹ Научно-производственное предприятие «Геологоразведка», Санкт-Петербург.

A.B. Velikin, A.A. Velikin

A NEW CORRELATION TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD WITH NOISE-LIKE SIGNALS (CTEM) FOR EARTH ELEKTROMAGNETIC SOUNDING IN OIL AND GAS

Abstract. *A new correlation transient electromagnetic method with special noise-like signals and a prototype system CTEM-1 for more resolution and depth penetration in oil and gas prospecting are presented after field testing in Kaluga, Krasnoyarsk and Irkutsk regions in 2012 -2014. The resolution and depth penetration of the CTEM method are compared with the conventional TEM by physical and mathematical modeling. The main results of the CTEM method as well as prototype system CTEM-1 field testing are analyzed in the next paper of the proceedings.*

Keywords: *transient electromagnetic, TEM, CTEM, noise-like signals, pseudo random binary sequence (PRBS).*

1. История вопроса

В течение последних десятилетий индукционная импульсная электроразведка *TEM* широко используется в региональных исследованиях при поисках нефти для изучения геоэлектрического строения осадочного чехла, выделения зон коллекторов с высокоминерализованными водами, а также поиска и картирования водонефтяного контакта в зонах развития проводящих коллекторов. Кроме того, она давно и успешно применяется для поисков рудных месторождений, а также подземных термальных и пресных вод [9].

Основной проблемой метода является его низкая устойчивость к широкополосному шуму, которая ограничивает глубинность исследований. Современные технологии измерения ЭМ полей позволяют существенно подавлять помехи, сосредоточенные в узких промежутках времени (импульсные помехи) или в узкой полосе частот (промышленные помехи на частоте 50 Гц и ее гармоники). Широкополосный или «белый» шум можно уменьшить только путем накопления сигнала или увеличения мощности источника ЭМ поля, что связано с многократными затратами времени и энергии.

Низкая помехоустойчивость импульсной электроразведки является следствием технического противоречия между точностью измерения сигнала и шириной полосы частот пропускания. Действительно, процесс измерения переходной характеристики электрического разреза заключается в определении средних значений сигнала на заданных интервалах времени. Чем меньше временной интервал, тем точнее среднее значение соответствует значению сигнала в центре интервала, но и тем шире полоса частот пропускания и выше уровень помех, ухудшающих точность измерений.

Для преодоления этого противоречия в методе *CTEM* определяется максимизирующая отношение сигнал/шум взаимная корреляционная функция специальных псевдослучайных (шумоподобных) возбуждающих электромагнитное поле и принимаемых сигналов [2]. Эта функция пропорциональна импульсной характеристике геоэлектрического разреза в частотном окне. *CTEM* – принятое нами обозначение корреляционного метода импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами (ШПС) наряду с широко распространенным *TEM*, получившим это наименование после экспорта однопетлевого варианта метода переходных процессов МПП и российской аппаратуры МППО-1 в Австралию в конце 60-х и начале 70-х гг. [4, 8].

Шумоподобные псевдослучайные сигналы успешно применяются в системах радиолокации, гидролокации, радиосвязи и передачи информации [1]. Попытки использования этих сигналов применительно к электроразведке предпринимались с начала семидесятых годов, но первые значимые результаты применения псевдослучайных бинарных последовательностей тока в геоэлектроразведке были опубликованы только в 1980 г. С помощью этих последовательностей было произведено глубокое электромагнитное зондирование в Канаде [7]. Конечным результатом полевых наблюдений были частотные характеристики геоэлектрического разреза.

В 2008 г. были продемонстрированы результаты успешного использования псевдослучайных бинарных последовательностей тока при поисках нефтяных месторождений в море [10]. Импульсные характеристики геоэлектрического разреза были получены путем обратной свертки непосредственно измеренных псевдослучайных напряжений и тока без корреляционной обработки, которая обеспечивает повышение отношения сигнал/шум. Поэтому обратная свертка производилась только после накопления сигнала, достаточного для получения отношения сигнал/шум не менее 30.

В 2010–2011 г. проводились численные исследования по применению шумоподобных сигналов в электромагнитных зондированиях с использованием алгоритма их обработки без корреляционной фильтрации [6]. Полученное при этом увеличение отношения сигнал/шум, как указано в этой работе, существенно меньше того, что можно получить при корреляционной обработке.

В 2011–2013 гг. проведены математические исследования шумоподавления при возбуждении и корреляционной обработке шумоподобных сигналов и начальный полевой эксперимент измерения и корреляционной обработки этих сигналов с малой генераторной петлей 50×50 м, на временах до 10 мс [5] без выделения полезного сигнала, непосредственно характеризующего геоэлектрический разрез.

Таким образом, в работах последнего десятилетия за исключением последней, находившейся на начальной стадии, результатом наблюдений были импульсные характеристики без корреляционной обработки данных измерений.

В настоящей работе представлены метод *СТЕМ* и экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса *СТЕМ-1*, которые были созданы в результате НИР по базовому проекту «Роснедра» в 2009–2011 гг. и усовершенствованы в процессе полевого опробования на полигоне с типичным платформенным разрезом в Калужской области и на двух полигонах Восточной Сибири в 2012–2014 гг.

Оценка эффективности метода проведена путем физического и математического моделирования.

2. Физические основы метода

Комплекс *СТЕМ* создает в генераторной петле специальную троичную, шумоподобную псевдослучайную последовательность пакетов полусинусоидальных импульсов тока (рис. 1а). В заземленной генераторной линии можно использовать аналогичную последовательность прямоугольных импульсов тока (рис. 1б).

Одновременно с возбуждением импульсов тока в генераторном контуре комплексом *СТЕМ* регистрируется: временной ряд значений тока I и соответствующий ему ряд значений напряжения V в приемном контуре. В качестве приемного контура могут использоваться одновитковые или многовитковые петли (рамки).

По измеренным массивам напряжения V и тока I определяется взаимная корреляционная функция $R_{V,I}$ этих массивов и линейно связанная с ней импульсная характеристика h_F геоэлектрического разреза в частотном окне:

$$h_F = R_{V,I} / K, \quad (1)$$

где K – постоянная величина.

Троичная последовательность (рис. 1а, 1б) образуется путем преобразования известной псевдослучайной бинарной последовательности импульсов тока (рис. 1в), определяемой, например, путем моделирования работы n -разрядного сдвигового регистра с обратной связью через логический элемент «исключающее или» [1], в псевдослучайную последовательность пакетов регулярных импульсов тока. Использование троичной псевдослучайной последовательности обеспечивает одинаковую степень искажения каждого пакета импульсов тока индуктивностью генераторного контура, а полусинусоидальная форма позволяет, за счет резонансных свойств генераторного контура, уменьшить эти искажения. Все это обеспечивает минимизацию собственных шумов в импульсной характеристике. Важную роль играет форма автокорреляционной функции (АКФ) используемых последовательностей импульсов тока, которая при шаге, равном периоду импульсов тока, совпадает с треугольной δ -образной формой АКФ (рис. 1г) известной последовательности импульсов тока (рис. 1в). Основание треугольной формы численно равно удвоенной длительности пакета импульсов тока. Под длительностью пакета понимается длительность минимального набора импульсов тока одной полярности.

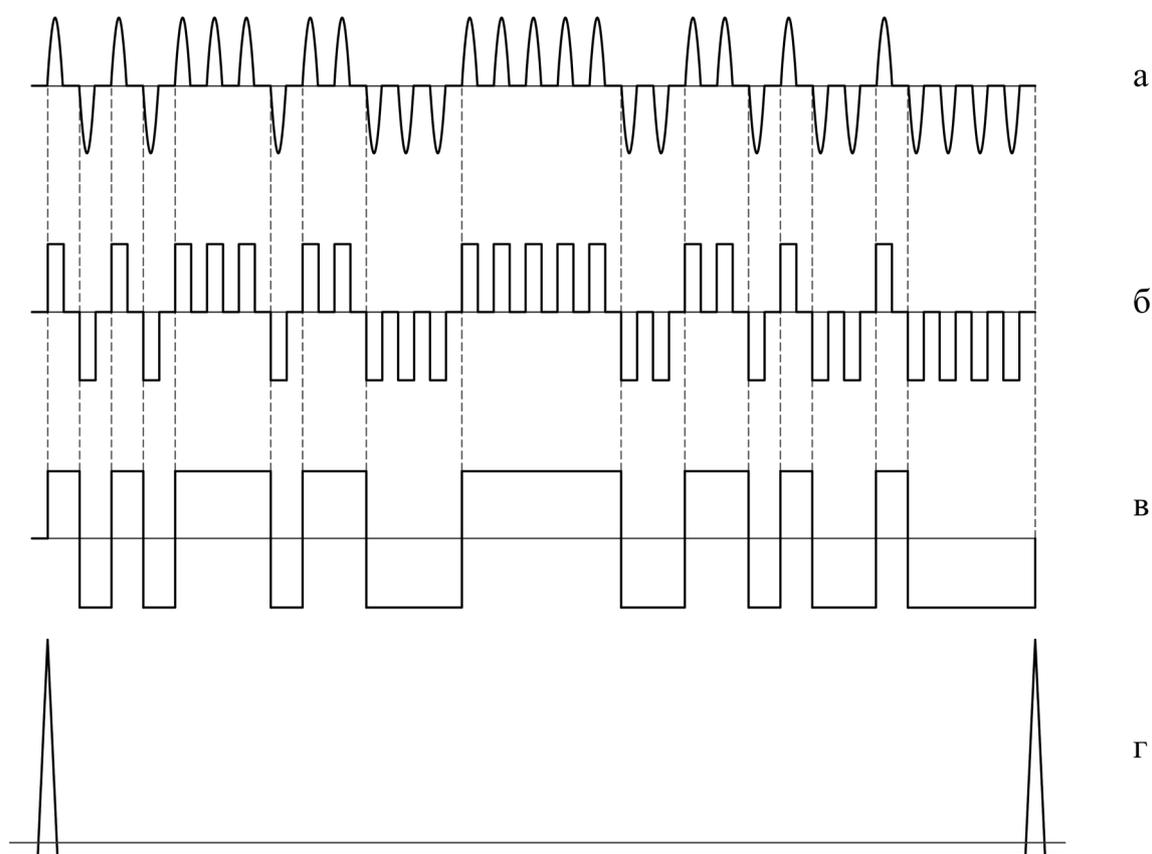


Рис. 12. Псевдослучайные последовательности импульсов тока и их автокорреляционные функции: а) псевдослучайная последовательность пакетов полусинусоидальных периодических импульсов тока $PRTS$, б) псевдослучайная последовательность пакетов прямоугольных периодических импульсов тока $PRTS$, в) псевдослучайная последовательность импульсов тока $PRBS$, г) автокорреляционная функция трех указанных последовательностей

Рассмотрим физический смысл импульсной характеристики (1). Известно, что для системы, состоящей из генераторного и приемного контуров, напряжение V в приемном контуре есть свертка импульсной характеристики h разреза с током I в генераторной петле:

$$V = h \check{\Delta} I, \quad (2)$$

где знак $\check{\Delta}$ обозначает операцию свертки.

Известно также, что взаимная корреляционная функция $R_{X,Y}$ входного X и выходного Y сигналов в линейной системе есть свертка импульсной характеристики h этой системы с автокорреляционной функцией входного сигнала $R_{X,X}$. Для индукционной электроразведки входным сигналом является ток I в генераторной петле, а выходным сигналом – напряжение V в приемной петле. Таким образом, взаимная корреляционная функция имеет вид:

$$R_{V,I} = h \check{\Delta} R_{I,I}. \quad (3)$$

Величины $R_{V,I}$, $R_{I,I}$ и h являются временными массивами. Сравнение (2) и (3) показывает, что для линейной системы, которой является земля, автокорреляционную функцию $R_{I,I}$ можно считать входным возбуждающим сигналом, в такой же мере, как ток I в генераторной петле, а взаимно-корреляционную функцию $R_{V,I}$ выходным сигналом этой системы, в такой же мере, как напряжение V в приемной петле. Поскольку $R_{I,I}$ является треугольной δ -образной функцией (рис. 1г), то для достаточно малой длительности пакета импульсов тока она будет отличаться от δ -функции Дирака только множителем K , равным площади треугольной формы автокорреляционной функции $R_{I,I}$:

$$R_{V,I} = h \check{\Delta} K\delta. \quad (4)$$

В этом случае знак $\check{\Delta}$ свертки в (4) можно заменить знаком умножения, поскольку свертка произвольной функции $f(t)$ с δ -функцией по определению равна $f(t)$. Отсюда получим отношение:

$$h = R_{V,I}/K, \quad (5)$$

где h – классическая импульсная характеристика геоэлектрического разреза.

Таким образом, для пренебрежимо малой длительности пакета импульсов тока импульсная характеристика геоэлектрического разреза в частотном окне h_F , определенная по формуле (1), будет соответствовать классической импульсной характеристике h . Для произвольной длительности пакета импульсов тока h_F является откликом геоэлектрического разреза на треугольный импульс тока, конгруэнтный треугольной форме АКФ (с вершиной, равной максимуму $R_{I,I}$, и основанием, равным удвоенной длительности пакета импульсов тока T_p). При этом, h_F можно рассматривать как результат свертки классической импульсной характеристики h с треугольной формой $R_{I,I}$. Квази-прямоугольный спектр АКФ образует частотное окно в полосе частот от $F_1 = 1/T$, до $F_2 = 1/(2T_p)$, где T – длина псевдослучайной последовательности:

$$T = (2^n - 1)T_p, \quad (6)$$

а T_p – длительность пакета импульсов тока:

$$T_p = 2(T_i + T_0) \times N_i, \quad (7)$$

где T_i – длительность импульса тока, T_0 – длительность паузы, а N_i – число импульсов тока в пакете. Таким образом, определяемую методом СТЕМ величину h_F действительно можно считать импульсной характеристикой геоэлектрического разреза в частотном

окне (F_1-F_2), а описываемый процесс измерения и определения h_F в частотном окне можно представить как зондирование треугольным импульсом виртуального тока путем последовательного увеличения его длительности.

Электромагнитное зондирование осуществляется путем измерений и корреляционной обработки временных массивов I и V , производимых при последовательно увеличивающейся длительности пакета импульсов тока в результате увеличения N_i (или T_i) и соответствующего сужения и сдвига в низкочастотную область окна F_1-F_2 . При этом пропорционально увеличивается длина последовательности T , а спектр возбуждения сдвигается в область низких частот без уменьшения интенсивности низкочастотных составляющих. Для каждого из частотных окон определяется соответствующая импульсная характеристика h_F .

Увеличение длины последовательности только за счет увеличения ее порядка n при неизменной длительности пакета, соответствующее расширению частотного окна в область низких частот, увеличивает число только низкочастотных гармонических компонент, но их интенсивность уменьшается обратно пропорционально T . Это обстоятельство и делает необходимым при расширении частотного окна в область более низких частот одновременно смещать в эту область и верхнюю границу частотного окна. В этом случае становится понятным, что при возбуждении глубокой части разреза влияние верхней части разреза, которое искажает результаты глубокого зондирования в импульсной традиционной электроразведке ЗСБ, ослабляется из-за отсутствия в спектре АКФ $R_{I,I}$ частот $F \geq F_2$. Следует отметить, что в соответствии с формулой (2) при вычислении $R_{V,I}$ массив I играет роль согласованного фильтра, максимизирующего отношение сигнал/шум.

Фактически измеряются не один, а два ряда значений напряжения в приемном контуре V_1 (синхронного с импульсами тока) и V_2 (в паузах между импульсами тока). По измеренным массивам V_1 , V_2 и I определяются функции взаимной корреляции $R_{V_1,I}$ и $R_{V_2,I}$ и линейно связанные с ними две характеристики h_{F1} и h_{F2} геоэлектрического разреза. Первая соответствует измерениям значений V_1 , синхронным с импульсами тока, вторая – измерениям значений V_2 в паузах между ними. В паузах измеряются сигналы только вторичного поля, что позволяет повысить точность измерений.

С помощью специально разработанной для метода *STEM* программы интерпретации (А.А. Петров и др.), по наборам импульсных характеристик строится геоэлектрический разрез по профилю. Эта операция отличается тем, что на каждой точке наблюдения одновременно подбирается весь набор импульсных характеристик.

Метод *STEM* реализован с помощью экспериментального образца комплекса *STEM-1*.

3. Программно-аппаратный комплекс *STEM-1*

Комплекс *STEM-1* содержит генератор полусинусоидальных импульсов тока (1) и измеритель напряжения (2), управляемые полевым компьютером (3), систему *GPS* с антенной (4) и коммутационное входное устройство (5), к которому подключаются генераторная и приемная петли, блоки питания генератора (6) и измерителя (7) (рис. 2).

Основные технические характеристики экспериментального образца STEM-1

Изменяемые параметры: напряжение и ток ШПС в петлях, м:	100×100 – 800×800
Длительность синусоидальных импульсов тока, мкс:	50 – 10000

Амплитуда импульсов тока, А:	0,5 – 20
Диапазон времени регистрации I и V , с:	0,000005 – 20
Максимальное измеряемое напряжение, В:	10
Динамический диапазон определения h_F , дБ:	180
Максимальное напряжение в генераторной петле, В:	600
Среднеквадратическая погрешность определения h_F , %:	не более 3

4. Физическое и математическое моделирование

Для объективной оценки потенциала нового метода было необходимо изучить его особенности и сравнить его эффективность с традиционным методом на физических моделях упрощенного геоэлектрического разреза, используя комплекс *STEM-1* и электроразведочную систему Цикл-7. На этих же моделях необходимо было также подтвердить численным моделированием достоверность импульсных характеристик h_F , получаемых по результатам физических измерений.

Были использованы две физические модели: **М1** – модель вмещающих горных пород (рис. 3а) графитовый цилиндр $\varnothing 700 \times 400$ мм с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 1,18 \times 10^{-5}$ Ом·м, **М4** – модель вмещающих горных пород с флюидонасыщенным хорошо проводящим слоем, ограниченным по горизонтальной оси X (граница хорошо проводящего флюидонасыщенного пласта и нефтяной залежи) – указанный выше графитовый цилиндр с алюминиевой пластиной $800 \times 500 \times 4$ мм и $\rho = 5,26 \times 10^{-8}$ Ом·м на глубине 200 мм (рис. 4б).



Рис. 13. Экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса *STEM-1*.

1 – генератор импульсов тока, 2 – измеритель, 3 – полевой компьютер, 4 – устройство синхронизации GPS с антенной, 5 – коммутационный блок, 6 – блок питания генератора, 7 – блок питания измерителя

Относительно малый диаметр (700 мм) физических моделей явился причиной возникновения краевых эффектов. Поэтому были введены дополнительные математические модели **M16** и **M23**, в которых увеличены размеры блоков вмещающей среды в **M1** и **M4** соответственно: до $\varnothing 10 \times 10$ м.

Были выбраны масштабы моделирования 1:10000 и 1:20000. При масштабе 1:10000 использовалась измерительная установка 1-соосные 30-витковые генераторная 80×80 мм и приемная 40×40 мм рамки. При масштабе 1:20000 использовалась измерительная установка 2-соосные 30-витковые генераторная 40×40 мм и приемная 20×20 мм рамки. Соосные рамки располагаются над центром моделей. Модели проводящей среды для указанных масштабов одни и те же. Для установки 1 глубина до проводящего пласта в модели **M4** (200 мм) соответствует реальной глубине 2000 м, для установки 2 – 4000 м.

В соответствии с условиями электромагнитного подобия, при масштабе моделирования 1:10000 графитовые модели представляют горные породы с $\rho = 1180$ Ом·м, а при масштабе моделирования 1:20000 – $\rho = 4720$ Ом·м. В обоих случаях можно считать, что это непроводящие породы. Чтобы моделировать горные породы с практически значимыми ρ , например 118 Ом·м, необходимо использовать времена моделирования соответственно в 10 и 40 раз меньше натуральных.

Режимы модельных измерений с комплексом *STEM-1* показаны в табл. 1, где n – порядок последовательности, T_i – длительность импульса тока, N_i – количество импульсов тока в пакете, N_n (**M1**) – общее число накоплений для модели **M1**, N_n (**M4**) – общее число накоплений для модели **M4**.

Режимы модельных измерений с электроразведочной системой Цикл-7 показаны в табл. 2.

Таблица 1

Режимы модельных измерений с комплексом *STEM-1*

№	n	$T_i, \text{мс}$	N_i	N_n (M1)	N_n (M4)	Ток, А
1	12	0,05	1	1280	960	0,4
2	2	0,1	1	640	480	0,4
3	8	0,5	1	2048	1536	0,4
4	5	0,5	5	2048	1536	0,4
5	5	0,5	15	2048	1536	0,4
6	5	0,5	30	2048	1536	0,4
7	5	0,5	45	2048	1536	0,4
8	5	0,5	90	512	256	0,4

Таблица 2

Режимы модельных измерений с электроразведочной системой Цикл-7

Длительность импульсов тока, с	Время регистрации, с	Число временных задержек	Число накоплений	Ток, А
0,1 с	$4 \times 10^{-7} - 0,1274$	112	12x512	0,87

Математическое моделирование проводилось с помощью программы моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов «*Elcut 6.0*» [3] и собственной программы моделирования измерений ШПС и определения по ним импульсных характеристик геоэлектрического разреза в частотном окне «Моделирование 8.31».

Для получения представления о форме кривых h_F и их связи с классической импульсной характеристикой h рассмотрим эти характеристики, рассчитанные с помощью

программы «*Elcut 6.0*», как реакцию модели **M1** с установкой 1 на импульс тока треугольной формы R_{LI} с единичной площадью и основанием, равным $2(T_i+T_0) \times N_i$ (рис. 3а). Форма h_F для импульсов тока $T_i = 50$ и 100 мкс ($N_i = 1$) близка к реакции на δ -импульс, т. е. к классической импульсной функции h . По мере увеличения N_i импульсные характеристики становятся все более крутыми. При этом их форма совпадает с соответствующими по времени частями классической импульсной функции. Это хорошо видно при вертикальном смещении h_F вниз для $N_i = 15, 30, 45, 90$ до их совмещения с классической h . В этом случае методом *СТЕМ* можно определять форму классической импульсной характеристики, значения которой на несколько порядков меньше реально измеряемых h_F . Таким образом, для рассматриваемой модели чувствительность к сигналам на поздних стадиях переходного процесса у нового метода на несколько порядков выше, чем у традиционного метода ЗСБ (зондирование становлением поля в ближней зоне). Существенную роль здесь играют краевые эффекты из-за относительно малого диаметра модели.

На рис. 3б к h_F на модели **M1** добавлены h_F на модели **M16**, где влияние границ модели практически отсутствует (установка 2). Здесь все асимптоты кривых h_F являются касательными к кривой h . На самых ранних стадиях они совпадают с h_F на модели **M1**.

На рис. 3в приведены h_F по результатам измерений с комплексом *СТЕМ-1* (установка 1) и математического моделирования по программам «*Elcut 6.0*» и «Моделирование 8.31» на модели **M1**. Импульсные характеристики, определенные по измерениям на фоне импульсов тока и в паузах между ними, хорошо совпадают между собой и с результатами вычислений по указанным выше программам. Динамический диапазон для полного набора h_F по данным измерений составляет 180 дБ. Максимальное время регистрации h_F равно 0,1 с. Уровень собственных шумов для h_F при максимальной длительности пакета и токе 0,4 А составляет 0,3 мкВ/(А·с). На этом же рисунке приведены результаты измерения переходной характеристики $H(t)$ разреза методом ЗСБ с электроразведочной системой Цикл-7. Максимальное время надежной регистрации $H(t) - 0,01$ с. Измеренные $H(t)$ также хорошо совпадают с расчетными («*Elcut 6.0*»).

На рис. 4а показаны h_F и $H(t)$ на модели **M4** вмещающих горных пород с ограниченным по горизонтали флюидонасыщенным пластом (установка 1) по результатам вычислений и измерений с комплексом *СТЕМ-1* и с системой Цикл-7.

В обоих случаях результаты измерений и вычислений хорошо совпадают и уверенно отмечается хорошо проводящий пласт (алюминиевая пластина) на глубине 200 мм (2000 м в натуральных условиях) по затянутому спаду h_F для $N_i \geq 5$. Здесь также наблюдается краевой эффект, но он связан не только с вертикальными границами графитового цилиндра, как на модели **M1**, но и с границей алюминиевой пластины, на 200 мм смещенной от края графитовой модели к ее центру (рис. 2б). Время регистрации h_F для $N_i \geq 30$ существенно больше времени регистрации поздних стадий переходной характеристики. Импульсные характеристики измеряются до 100 мс, а переходная до 30 мс. Так же как на модели **M1**, по импульсным характеристикам h_F можно определить форму поздних стадий классической импульсной характеристики h , значения которой существенно меньше значений h_F .

На рис. 4б показаны рассчитанные h_F на модели **M23**, которая отличается от **M4** тем, что вмещающая среда практически безгранична (установка 1). В этом случае задача выделения проводящего пласта становится еще проще. Сигнал от пласта складывается с увеличенным сигналом от вмещающей среды.

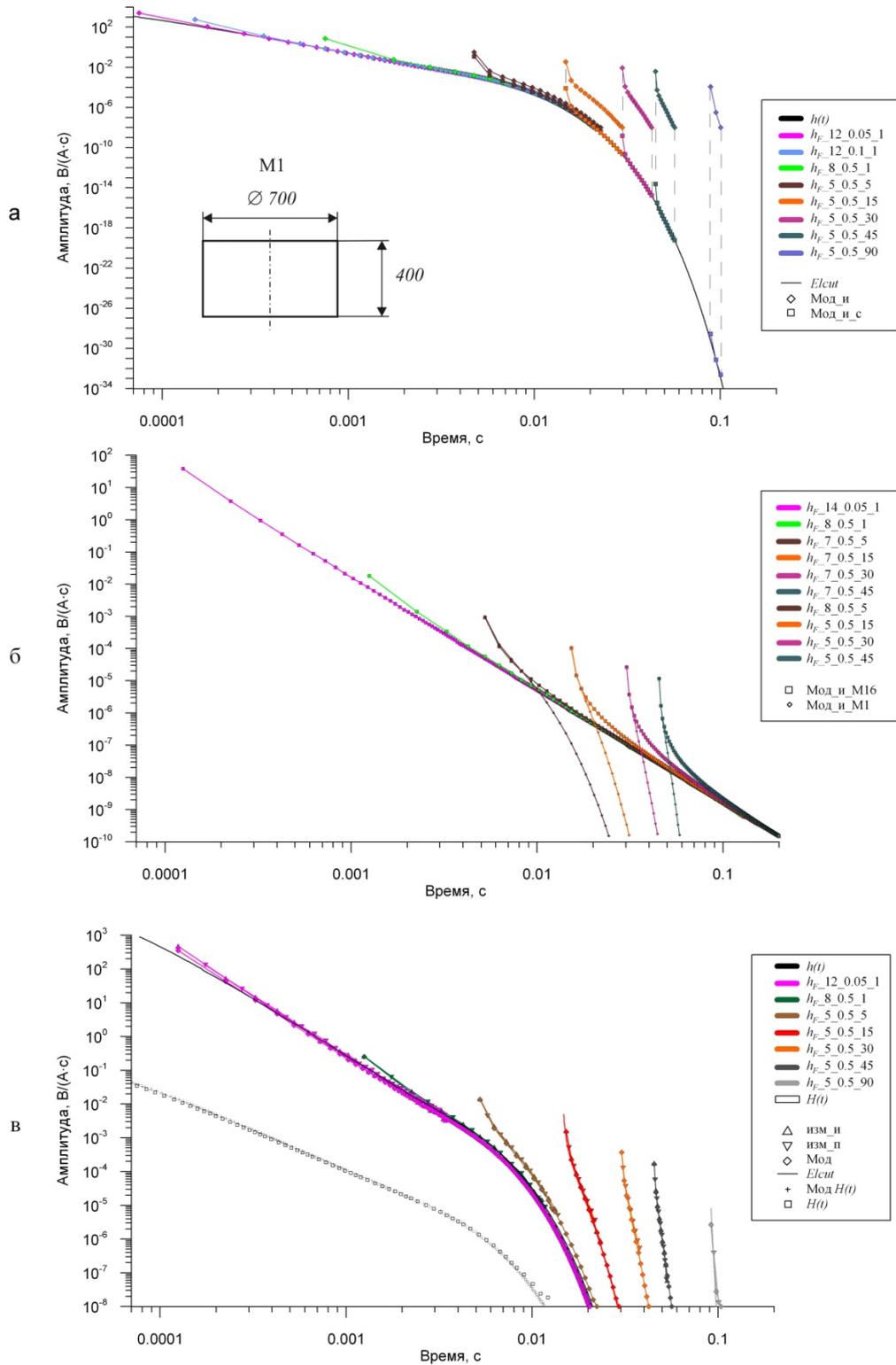


Рис. 14. Импульсные h_F и переходная характеристика $H(t)$ по результатам измерений и расчетов на моделях вмещающих горных пород.

- а) Рассчитанные h_F и классическая импульсная характеристика h , модель M1 (установка 1).
- б) Рассчитанные h_F для моделей M16 и M1 (установка 2). в) Величины h_F по результатам расчетов и измерений с комплексом СТЕМ-1 и $H(t)$ по результатам расчетов и измерений с системой Цикл-7, модель M1 (установка 1). Шифр кривых: $h_F_n_Ti_Ni$, n – порядок последовательности, Ti – длительность импульса, мс, Ni – количество импульсов тока в пакете, Elcut/Мод – вычисленные по программам «Elcut6.0»/«Моделирование 8.31», изм_и/п – по измерениям синхронным с импульсами тока/в паузах, M1/M16_модели, с – смещенные h_F

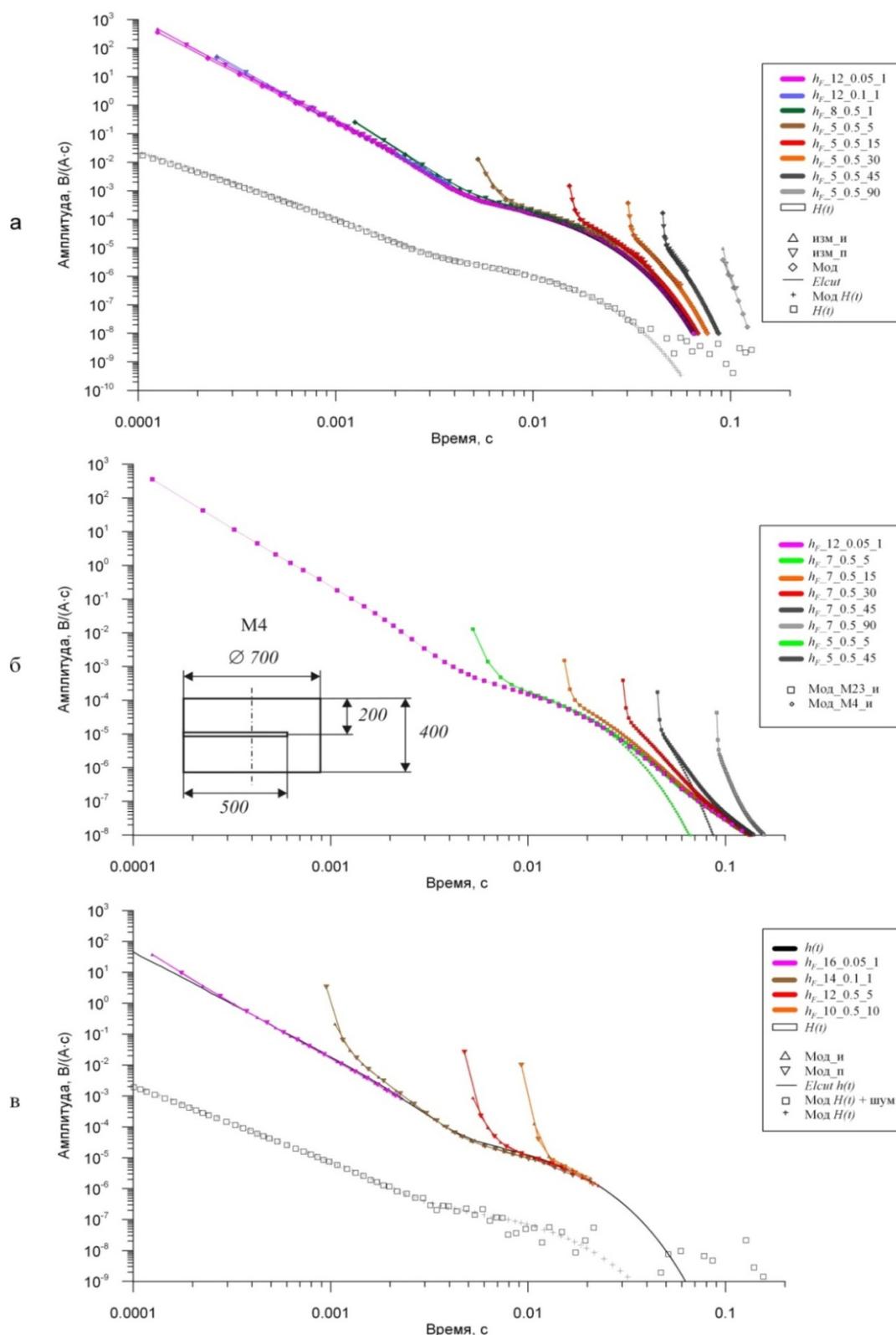


Рис. 4. Импульсные и переходная характеристики по результатам измерений и расчетов на моделях вмещающих горных пород с хорошо проводящим флюидоносным пластом.

Условные обозначения такие же как на рис. 3.

а) Величины h_F по результатам расчетов и измерений с комплексом СТЕМ-1 и переходные характеристики $H(t)$ по результатам расчетов и измерений с системой Цикл-7 на модели М4 (установка 1).

б) Рассчитанные h_F для моделей М4 и М23 (установка 1). в) Рассчитанные h_F и $H(t)$ для модели М4 при малом входном шуме 1 мкВ (установка 2)

На рис. 4в на той же модели **М4** показаны расчетные характеристики h_F и переходная характеристика $H(t)$ с установкой (2) при внешнем шуме 1 мкВ. В этом случае хорошо проводящий пласт, ограниченный по латерали (алюминиевая пластина) на глубине 200 м (4000 м в натуральных условиях), уверенно отмечается на h_F и не чувствуется на переходной характеристике $H(t)$. Таким образом, потенциальная глубинность метода *STEM* при наличии даже небольшого шума может быть существенно больше, чем у традиционного метода *TEM* (ЗСБ).

На всех моделях крутизна импульсных характеристик h_F больше, чем у переходных характеристик $H(t)$, и, следовательно, в методе *STEM* разрешающая способность по электропроводности и размерам проводящих объектов выше, чем в ЗСБ.

Коэффициент подавления широкополосного шума в методе *STEM* на модели **М1** для последовательности с $n = 8$ и $T = 255$ мс составляет около 400 по расчету и по измерениям, а для последовательности с $n = 12$ и $T = 4095$ мс – около 1500.

Заключение

1. Новый корреляционный метод *STEM* импульсной электроразведки и экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса *STEM-1*, основанные на определении взаимной корреляционной функции специальных (шумоподобных) возбуждающих электромагнитное поле и принимаемых сигналов, обеспечивают получение импульсных характеристик разреза в частотных окнах при максимальном отношении сигнал/шум. Максимальное шумоподавление при корреляционной обработке достигает 3-х и более порядков, что позволяет работать с маломощными источниками энергии и при достаточно большой глубине исследований.

2. При зондировании благодаря ограничению частот пределами окна может быть значительно ослаблено влияние верхней части разреза.

3. Опробование комплекса *STEM-1* и системы Цикл-7 на физических моделях и подтверждение результатов измерений расчетами с использованием независимой программы моделирования ЭМ полей методом конечных элементов доказывает достоверность получаемых импульсных характеристик h_F и позволяет сделать следующие выводы:

– по импульсным характеристикам в частотном окне (для моделей массивов проводящих горных пород, ограниченных по латерали) можно определять форму классической импульсной характеристики разреза, значения которой на несколько порядков меньше реально измеряемых h_F ;

– крутизна импульсных характеристик h_F значительно больше, чем у переходных характеристик $H(t)$, и, следовательно, импульсные характеристики имеют более высокую чувствительность к изменению электропроводности и размеров проводящих объектов;

– при малом аддитивном шуме моделируемая глубина выделяемого хорошо проводящего коллектора по h_F (*STEM-1*) составляет 4000 м, а по $H(t)_T$ – 2000 м (Цикл-7).

Таким образом, новый метод *STEM* и экспериментальный образец комплекса *STEM-1* обладают существенно большей потенциальной глубинностью и разрешающей способностью по сравнению с традиционными методом и аппаратурой. Поэтому можно ожидать, что внедрение в практику геологоразведочных работ новой конкурентоспособной и экономичной технологии электромагнитного зондирования недр на основе промышленных образцов комплекса *STEM-1* значительно повысит эффективность проводимых геологоразведочных работ на нефть, газ и другие виды полезных ископаемых.

Библиографический список

1. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
2. *Великин А.Б.* Способ электроразведки и устройство для его осуществления (варианты): патент 2354999 РФ: МПК G01V 3/08/; заявл. 04.07.07; опубл. 10.05.09, Бюл. № 13.
3. *Дубицкий С.Д.* Программный комплекс *Elcut*, <http://elcut.ru/publications/dubitsky2.pdf>. (05.04.2015).
4. Жданов М.С. Сто лет электромагнитной геофизике: заметки о прошлом и дорога в будущее. Материалы V Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли ЭМЗ-2011. – Кн. 1. – СПб. : СПбГУ, 2011. – С. 54–87.
5. *Ильичев П.В., Бобровский В.В.* Применение шумоподобных сигналов в системах активной георазведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента). Сейсмические приборы, 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 5–9.
6. *Светов Б.С., Алексеев Д.А.* и др., Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля. Геофизика, 2012. – № 1. – С. 52–60.
7. *Duncan P.M.* et al. The development and applications of a wide band electromagnetic sounding system using a pseudo-noise source, *Geophysics*, vol. 45, no. 8, August, 1980. – P. 1276–1296.
8. *Velikin A.B., Bulgakov Ju.I.* Transient electromagnetic method (One loop version), *Proceedings of the UNO International Seminar*. – Moscow. – 52 pp. – 1967.
9. *Kamenetsky F.M., Stettler E.H., Trigubovich G.M.* Transient geo-electromagnetics. Ludwig-Maximilian-University of Munich. – 2010. – Munich.
10. *Ziolkowski A., Wright D.* Shallow water Multi-Transient EM Surveys in the North Sea, 3rd International Oil and Gas Symposium in Western Newfoundland, 14/09/2008.



УДК 550.837

Г.А. Грецов^{^1}, М.И. Эпов^{^1}, Е.Ю. Антонов^{^1}

**АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ
В ПРОСТРАНСТВО РЕШЕНИЙ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ**

Аннотация. *Статья посвящена преобразованию сигналов квазистационарных электромагнитных зондирований в волновую область. Рассмотрены два способа преобразований: на основе сингулярного разложения (SVD) и метода регуляризации Тихонова. Приведены примеры трансформаций для горизонтально-слоистых, поляризующихся и квазитрёхмерных геоэлектрических моделей.*

Ключевые слова: *transient electromagnetic sounding, wavefield transform of electromagnetic data, Q-transform, singular value decomposition, regularization.*

Об авторах:

^{^1} *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.*

G.A. Gretskov, M.I. Eпов, E.Yu. Antonov

**ALGORITHMS AND PROGRAMS FOR DATA CONVERSION
SOUNDING IN THE SPACE OF SOLUTIONS
OF THE WAVE EQUATION**

Abstract. The article is devoted to the transformation of the signals is quasi-stationary electromagnetic soundings in the wave region. Two ways of transformation have been considered: method, based on singular value decomposition (SVD) and Tikhonov regularization. Examples of transformations for horizontally layered, polarized and quasicriminal geoelectric models are presented.

Keywords: transient electromagnetic sounding, wavefield transform of electromagnetic data, Q -transform, singular value decomposition, regularization.

На сегодняшний день в разведочной геофизике широкое применение получил метод зондирования становлением поля (ЗС), основанный на изучении переходных характеристик электромагнитного поля от импульсного источника тока. Для интерпретации данных ЗС обычно используется метод инверсии, что является весьма ресурсоемким процессом, особенно в случае большого объема полевого материала (см. например [1]). В этой связи чрезвычайно полезны различные трансформации измеренных сигналов, например в кажущееся удельное сопротивление ρ_t или продольную проводимость $S_t(H_t)$. Использование трансформаций позволяет составить достаточно точное представление об исследуемом геоэлектрическом разрезе. Одним из возможных направлений развития данного типа интерпретации является использование сейсмических методов обработки геоэлектрических данных. Для того чтобы успешно применять сейсмические методы, к диффузионным данным ЗС необходимо применить отображение в волновую область. Данные преобразования записываются в виде интегральных уравнений [2-6]:

$$E(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha t}} \int_0^{\infty} F(q) \sqrt{\alpha} q e^{-\frac{\alpha q^2}{4t}} dq, \quad (1)$$

$$B(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha t}} \int_0^{\infty} G(q) \left[\frac{\alpha q^2}{2t} - 1 \right] e^{-\frac{\alpha q^2}{4t}} dq, \quad (2)$$

где $E(t)$ и $B(t)$ – компоненты электромагнитного поля, $F(q)$ и $G(q)$ – фиктивные векторные поля, удовлетворяющие системе волновых уравнений, q – фиктивное время, α – масштабирующий множитель. После дискретизации интегральные уравнения могут быть записаны в матричной форме:

$$A_1 F = B \quad \text{и} \quad A_2 G = E. \quad (3)$$

Так как решение F первого интегрального уравнения является неустойчивым, возникает необходимость в применении различных методов регуляризации [6]. Одним из подходов к решению является сингулярное разложение (SVD) матрицы A_1 . В результате разложения получается произведение трех матриц:

$$A_1 = ULV^T \quad \text{и} \quad U^T U = V^T V = VV^T = I. \quad (4)$$

Матрица L содержит на своей главной диагонали собственные значения матрицы A_1 , а I – является единичной. Тогда решение F может быть записано в следующем виде:

$$F = VL^{-1}U^T B. \quad (5)$$

Это решение необходимо стабилизировать, добавив к сингулярным значениям регуляризационный параметр k :

$$F = V(L^2 + kI)^{-1}LU^T B. \quad (6)$$

Другой способ стабилизировать решение уравнения – это использовать регуляризацию Тихонова. Определив матрицу регуляризации Γ , можно представить решение в виде:

$$F = (A_1^T W A_1 + \lambda \Gamma^T \Gamma)^{-1} A_1^T W B, \quad (7)$$

где λ – параметр регуляризации, а W – диагональная матрица содержащая ошибки вычисления [6]. В рамках данного исследования были реализованы оба алгоритма. Далее приводятся результаты использования процедур трансформаций для нескольких геоэлектрических моделей. Все расчеты выполнялись для индукционных разнесенных установок «петля-петля» с закрепленным источником и набором приемных рамок, удаляющихся с постоянным шагом по линии, исходящей из центра генераторной петли.

Рассмотрим трёхслойную горизонтально-слоистую контрастную модель: $\rho_1 = 10$ Ом·м, $h_1 = 2000$ м, $\rho_2 = 200$ Ом·м, $h_2 = 2500$ м, $\rho_3 = 1000$ Ом·м и рассчитаем переходные ЭДС для многоразносной установки. К полученным в результате расчетов данным применим обратное преобразование, используя SVD-регуляризацию и регуляризацию Тихонова (рис. 1). Используя положения экстремумов, полученных в результате преобразований «взвлетов», построим график зависимости времени прихода волны от разности установок – годографы.

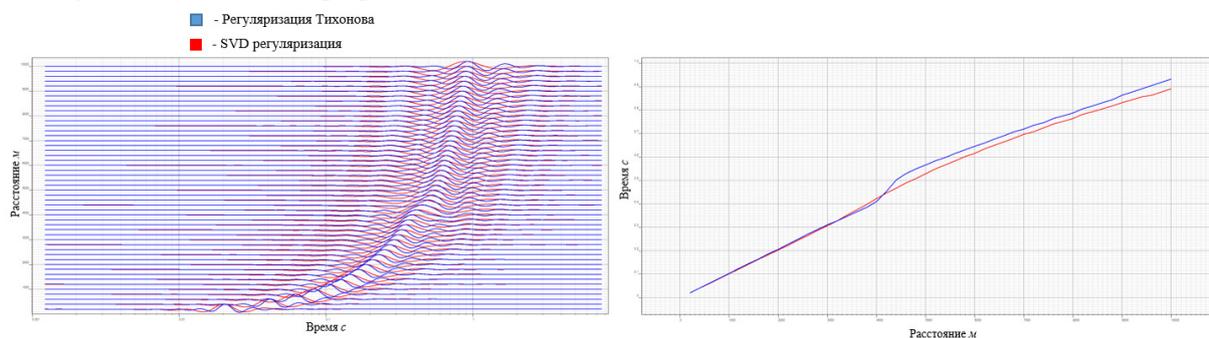


Рис. 15. Волновые поля и соответствующие им годографы для SVD и регуляризации Тихонова

Далее рассмотрим чувствительность годографа к изменению сопротивлений первого и второго слоев (рис. 2), а также мощности первого слоя (рис. 3).

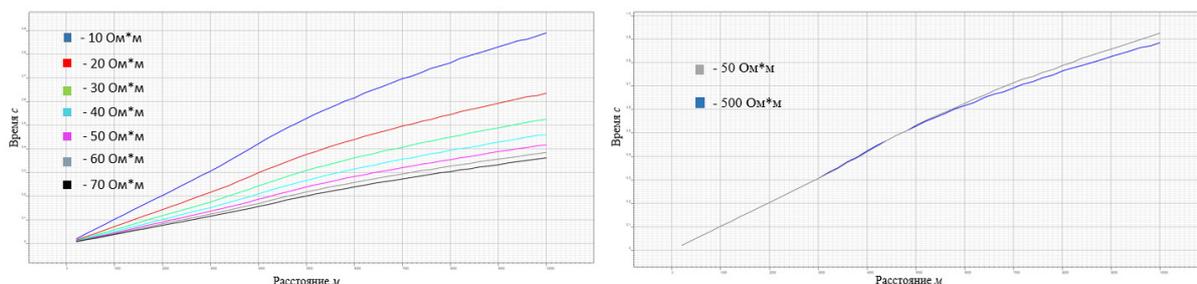


Рис. 16. Чувствительность годографа к сопротивлению первого (слева) и второго (справа) слоя

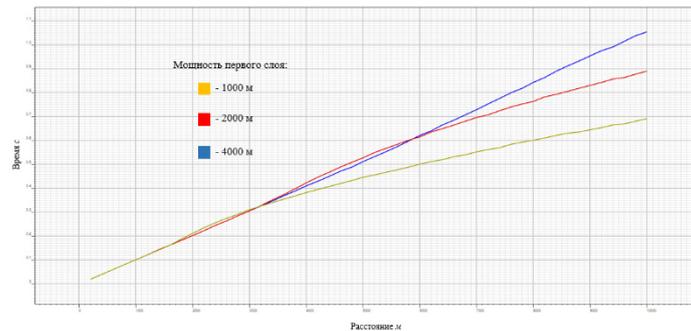


Рис. 17. Чувствительность годографа к мощности первого слоя

Чтобы оценить влияние вызванной поляризации (ВП), рассмотрим следующую модель $\rho_1 = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1 = 1000 \text{ м}$, $\rho_2 = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_2 = 1000 \text{ м}$, $\rho_3 = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_3 = 2500 \text{ м}$, $\rho_4 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ с поляризующимся вторым слоем с параметрами поляризуемости: $m = 0,5$, $\tau = 0,01 \text{ с}$, $c = 1$. Для описания низкочастотной дисперсии удельного сопротивления использовалась модель Cole-Cole [7]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\}. \quad (8)$$

Расчет переходных характеристик выполнялся для модели с учетом и без учета ВП, источник петля $1000 \text{ м} \times 1000 \text{ м}$, шаг по профилю 200 м от центра до 10000 м . На рис. 4 представлены результаты трансформации сигналов в виде волновой картины и годографов.

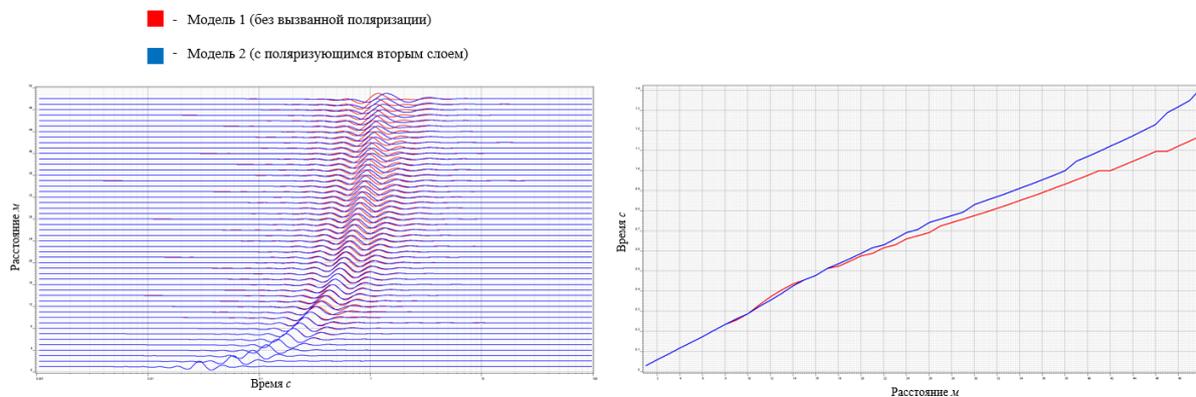


Рис. 18. Волновые поля и соответствующие им годографы для модели с учётом и без ВП

Рассмотрим горизонтально-слоистую модель и поместим во второй слой проводящую неоднородность, представляющую собой куполообразную структуру (рис. 5). Для данной модели методом ЗС с разнесенной установкой петля-петля рассчитаем кривые ЭДС, к которым применим преобразование в волновую область. На рис. 6 изображена волновая картина и соответствующие ей годографы в присутствии неоднородности и без нее.

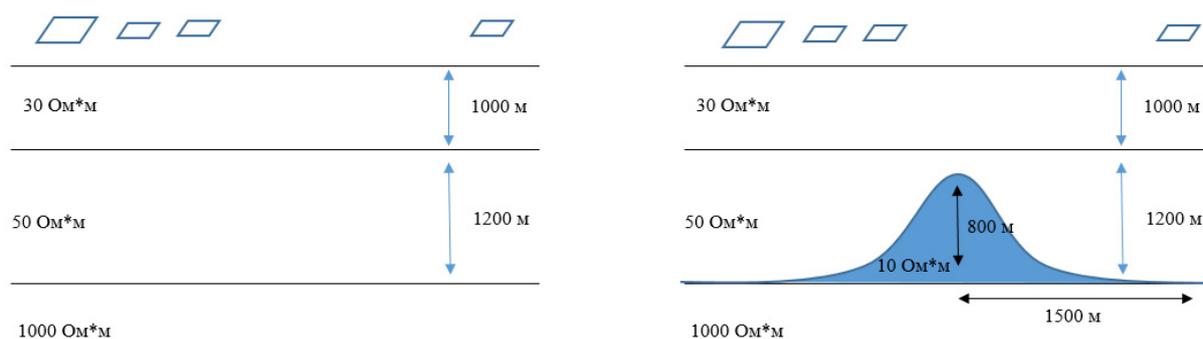


Рис. 19. Модель с неоднородностью

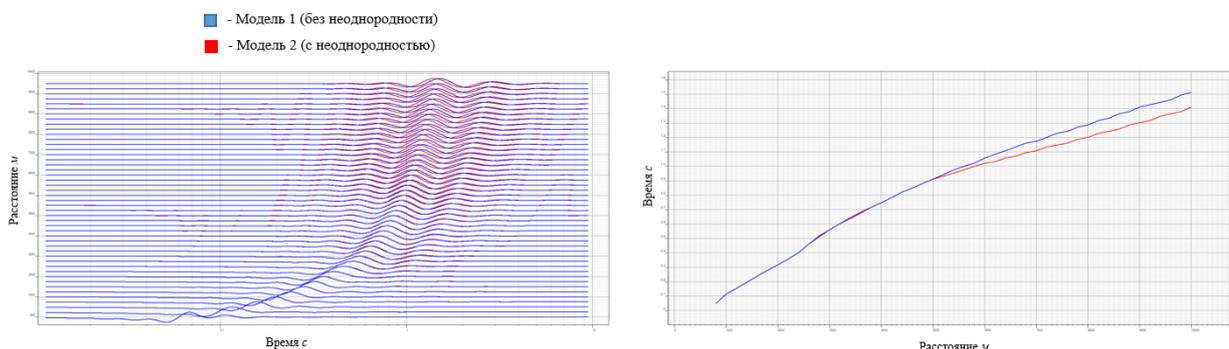


Рис. 20. Волновые поля и соответствующие им годографы модели с неоднородностью и без нее

Заключение

Реализованы процедуры трансформации данных импульсных электромагнитных зондирований в пространство функций, являющихся решением волнового уравнения.

Сопоставлены методы построения процедур трансформации с использованием SVD-разложения и метода регуляризации по Тихонову.

Рассмотрены примеры использования трансформации для горизонтально-слоистых, поляризующихся и квазитрёхмерных моделей геологических сред.

Библиографический список

1. Каменецкий Ф.М. Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. – М. : ГЕОС, 1997. – 162 с.
2. Резницкая К.Г. Связь между решениями задачи Коши для уравнений различных типов и обратные задачи // В кн.: Математические проблемы геофизики. – Новосибирск : ВЦ СО АН СССР. – 1974. – Вып. 5. – Ч. I. – С. 55–62.
3. De Hoop A.T. A general correspondence principle for time-domain electromagnetic wave and diffusion fields // Geophys. J. Int., 1996, 127. – Pp. 757–761.
4. Lee K.H., Lui G., Morrison H.F. A new approach to modeling the electromagnetic response of conductive media // Geophysics. – 1989. – V. 54, № 9. – Pp. 1180–1192.
5. Zhdanov M., Portniaguine O. Time-domain electromagnetic migration in the solution of inverse problems // Geophys. J. Int., 1997. – 131. – Pp. 293–309.
6. Swidinsky A. Transient Electromagnetic Modelling and Imaging of Thin Resistive Structures: Applications for Gas Hydrate Assessment // A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Department of Physics University of Toronto, 2011. – 255 p.
7. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. – Vol. 43. – NO 3. – 1978. – P. 588–609.



УДК 550.837.81

А.Ю. Давыденко^{^1}

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ GelioSMI

Аннотация. Возможности технологии основаны на методах векторизации полей с использованием скользящего окна и применении методов многомерного статистического анализа в классическом и робастном вариантах, что позволяет решать широкий круг задач обработки и интерпретации геофизических данных, представленных площадными съемками или пространственно-временными данными.

Ключевые слова: векторизация, скользящее окно, многомерные статистические методы, метод главных компонент, метод независимых компонент, регрессия, фильтрация геофизических данных, инверсия

Об авторах:

^{^1} Иркутский государственный университет, Иркутск.

A.Yu. Davydenko

GEOPHYSICAL DATA INTERPRETATION BASED ON GELIOSMI TECHNOLOGY

Abstract. The capability of the technology is based on the vectorization of a measured scalar field using a moving window technique and adaptation of classic and robust multivariate statistical analysis. This approach opens wide possibilities for processing and interpretation of area geophysical surveys and space-temporal data.

Keywords: vectorization, moving window, multivariate statistical methods, principal component analysis, independent component analysis, regression, geophysical data filtering, inversion.

Интерпретация геофизических данных на основе использования программы GelioSMI [2] позволяет по данным геофизических съемок выделять объекты, отражающиеся в физических полях аномалиями относительно невысокой контрастности. Такого рода аномалии, характерные для объектов относительно небольших, по отношению к сети наблюдений, размеров, как правило, осложнены интенсивными помехами. При решении задач структурно-геологического картирования помехи имеют, как правило, широкий пространственно-амплитудный диапазон. Их спектр в области высоких частот обусловлен, в основном, случайными ошибками измерений и эффектами мелкозалегающими неоднородностей. Физико-геологические неоднородности значительных размеров и глубин залегания, а также не полностью учитываемые в процессе обработки пространственно-временные вариации физических полей дают основной вклад в низкочастотную часть спектра. В частности, данные аэрогеофизических съемок обычно зашумлены не только короткопериодными случайными помехами, но длиннопериодными смещениями значений магнитного поля, электромагнитных сигналов на соседних профилях – т. н. эффект «профильности» – levelling [7]. Существенные проблемы в процесс компьютерной обработки и интерпретации вносит обычное наличие импульсных помех или аномальных «выбросов» поля. Совокупность этих факторов, а также латеральная изменчивость физико-геологических свойств пород и наличие источников физических полей в широком диапазоне глубин приводят к нестационарному характеру интерпре-

тируемых полей, выражающемся в существенной изменчивости по площади их уровня и корреляционных свойств.

Характерной особенностью технологии GelioSMI является векторное представление значений геофизических полей. В этом случае попавшие в окно обработки значения развертываются в вектор, характеризующий поведение поля в окрестности геометрического центра пространственного (пространственно-временного при обработке данных электромагнитных зондирований) окна. Подобный подход позволяет характеризовать каждую точку площади особенностями поведения поля в ее окрестности. Очевидно, что чем больше размеры окна, тем больше будет размерность многомерного пространства, определяемая количеством точек в окне обработки, и тем более детально эти особенности будут охарактеризованы многомерными статистиками анализируемого поля (оценки вектора математических ожиданий и ковариационной матрицы).

Корректность фильтрации полей с существенно изменчивыми пространственно-амплитудными свойствами достигается за счёт применения процедуры дифференциации (кластеризации) полей на основе самообучения, позволяющей выделять компактные и связанные в пространстве участки поля со стационарными по уровню, дисперсии и автокорреляционным свойствам характеристиками. В результате возможна реализация эффективного двумерного фильтра для экстраполяции и интерполяции нестационарных геофизических полей, в т. ч. на участках с изрезанными контурами или с локальным отсутствием данных.

В технологии GelioSMI реализован функционал, предназначенный для многомерного статистического анализа (метод главных компонент, метод независимых компонент, регрессионный анализ) и фильтрации в классических и робастных вариантах. Использование методов главных и независимых компонент для фильтрации сильно коррелированных данных (например, данные морского варианта зондирований дифференциально-нормированного метода электроразведки – ДНМЭ) основано на разложении анализируемых полей на главные (ортогональные) или статистически независимые компоненты. Дальнейшая фильтрация каждой из этих компонент в отдельности с обратным преобразованием минимизирует искажения, характерные для фильтрации коррелированных или зависимых данных.

Использование при расчетах фильтров робастных модификаций методов главных и независимых компонент основано на получении устойчивых к выбросам оценок векторов средних и ковариационных матриц выборок многомерных случайных величин на основе алгоритма минимального определителя ковариационной матрицы – MCD (Minimum Covariance Determinant), а многомерной линейной регрессии – на основе метода LTS (Least Trimmed Squares) с эффективными вычислительными реализациями FAST-MCD и FAST-LTS соответственно [8].

Применение способа векторизации полей с помощью скользящего окна в сочетании с классическими и робастными методами многомерного анализа и районированием полей по их статистическим свойствам открывают широкие возможности для реализации полосовой пространственно-временной фильтрации на основе метода главных компонент (рис. 1) [7].

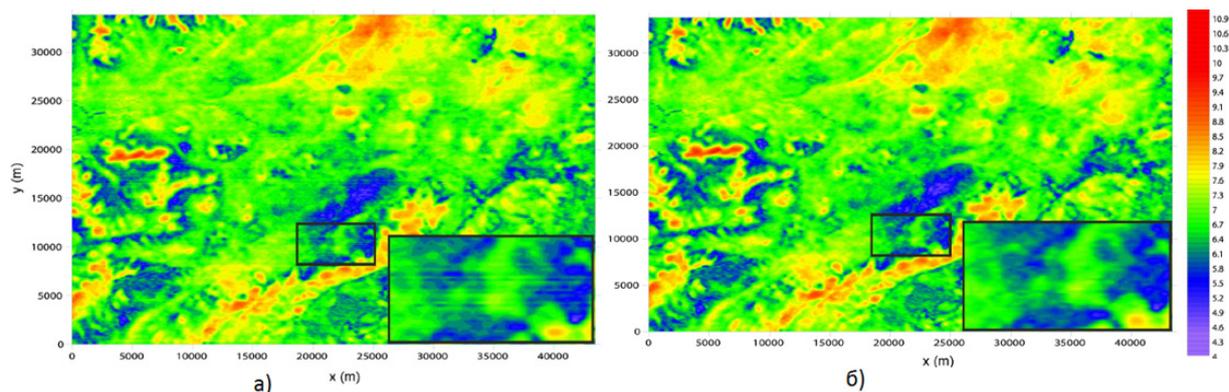


Рис. 21. Применение направленной фильтрации на основе МГК для подавления эффекта «профильности» в аэроэлектромагнитных данных: а) исходное поле логарифмов эффективного сопротивления на частоте 8320 Гц; б) это же поле после снятия эффекта «профильности»

Данные аэродИП [1] были использованы для подавления скин-эффекта с помощью пространственных фильтров на основе робастной многомерной регрессии. Последовательное исключение эффектов более высоких частот дает весьма существенный эффект, выражающийся в весьма значительном и допускающем содрожательное геологическое истолкование изменении структуры поля на низких частотах за счет подавления локальных аномалий, обусловленных близповерхностными геоэлектрическими неоднородностями [6] (рис. 2).

Методика робастного статистического анализа данных апробирована при изучении геоэлектрического разреза по данным площадных электромагнитных зондирований. Использование многомерных статистических методов фильтрации позволяет подавлять артефакты, возникающие в процессе одномерной инверсии профильных данных электромагнитов зондирований в рамках одномерной модели с учетом частотной дисперсии электропроводности. Для уменьшения эффекта эквивалентности использован аппарат робастного регрессионного анализа, что позволило выявить вклад времени релаксации τ и показателя степени c в удельное электрическое сопротивление и поляризуемость, а во времени релаксации выделить влияние показателя степени c . Для выделения в разрезе зон тектонических нарушений наклонного залегания использован аппарат адаптивной фильтрации и фильтрация методом главных компонент (рис. 3).

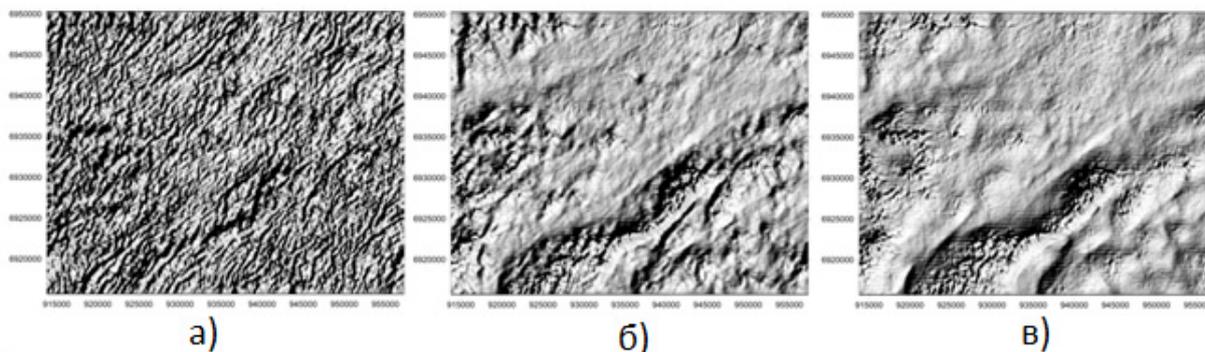


Рис. 22. Поля логарифмов эффективных сопротивлений для частот: 8320 Гц (а); 130 Гц (б) и результат подавления скин эффекта в поле на частоте 130 Гц (в)

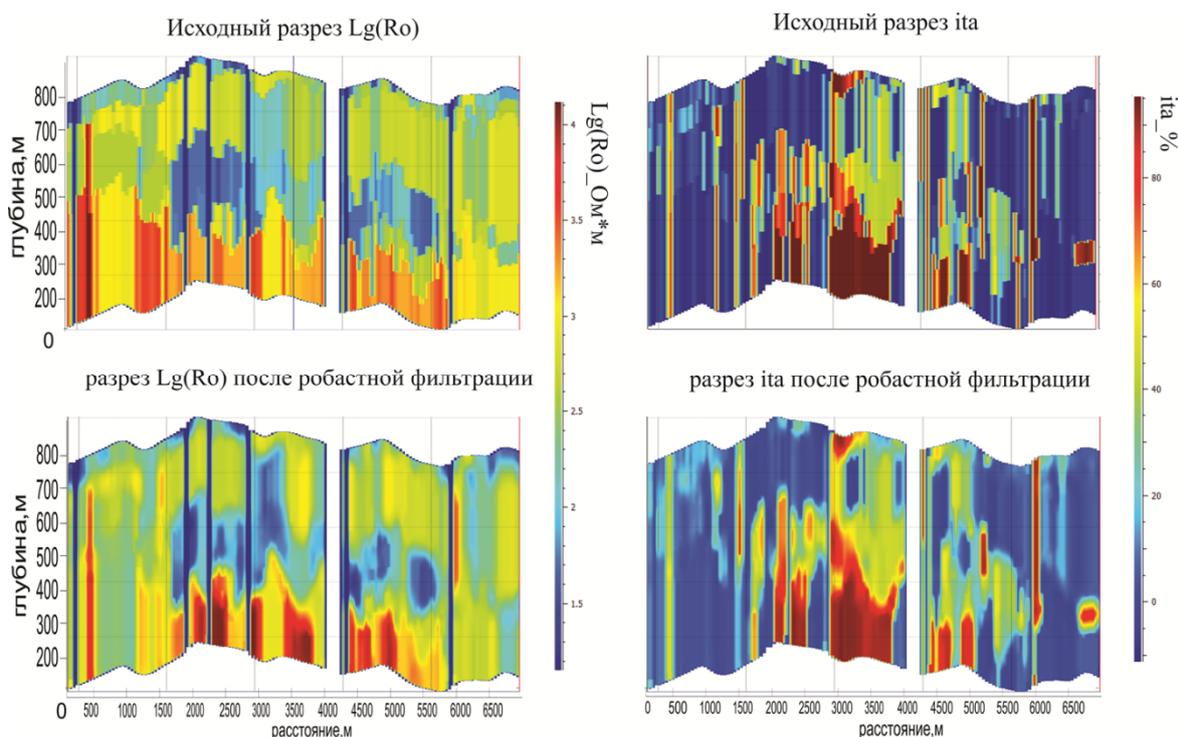


Рис. 23. Результаты робастной фильтрации геоэлектрического разреза

Важным элементом технологии, позволяющим комплексировать данные электро-разведочных методов с результатами площадных грави- и магниторазведочных съемок, является возможность трёхмерной инверсии потенциальных полей. В результате инверсии по данным площадных съемок может быть определено пространственное распределение избыточной плотности по данным гравиразведки и, в зависимости от модели магнитной среды, распределение составляющих вектора суммарной намагниченности или магнитной восприимчивости [4]. Инверсия проводится для полей, заданных на плоском или реальном рельефе для сетки ячеек в виде прямоугольных призм с регулируемыми горизонтальными и вертикальными размерами. Параметры инверсии определяются также количеством дополняющих ячеек для компенсации эффектов от объектов, находящихся за пределами сети наблюдений, значением параметра регуляризации, функцией взвешивания по глубине, количеством итераций для нахождения решения. Для того, чтобы сделать возможным инверсию больших объёмов данных без привлечения дорогих высокопроизводительных платформ, реализован так называемый метод опорной области [9], который позволяет локализовать зону влияния каждой точки измерения в модели и пренебречь эффектами, относительный вклад которых весьма мал. Для данных, измеренных на больших площадях, подобный подход позволяет значительно снизить объём требуемой памяти и времени при решении обратной задачи.

Библиографический список

1. Бабаянц П.С., Трусов А.А., Лаврова Т.Ю. Комплексные аэрогеофизические работы при поисках месторождений урана гидрогенного типа // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 7. – С. 56–60.
2. Грайвер А.В. Особенности представления данных и реализации ресурсоемких вычислений в программе обработки и интерпретации геофизических данных GelioSMI // Геоинформатика. – 2012. – № 3. – С. 20–27.

3. Грайвер А.В., Давыденко А.Ю. Робастные методы многомерного статистического анализа при изучении структуры геофизических полей // Материалы 39-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. – Воронеж : ВГУ, 2012. – С. 93–96.
4. Определение физико-геологических характеристик разреза с помощью инверсии данных электроразведки и магниторазведки при поисках подземных вод в условиях многолетней мерзлоты // Ю.А. Давыденко, А.Ю. Давыденко, П.А. Попков, С.В. Слепцов. Материалы 42-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. – Пермь : ГИ УФО РАН, 2015. – С. 66–69.
5. Технология интерпретации данных площадных геофизических работ в программном комплексе «GeliosMI» // А.В. Грайвер, А.Ю. Давыденко, П.А. Попков, С.В. Слепцов. Материалы 40-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. – М. : ИФЗРАН, 2013. – С. 115–120.
6. Эффект применения робастных методов многомерной статистики при обработке данных аэроэлектро-разведки // А.Ю. Давыденко, Ю.А. Давыденко, А.А. Трусов, А.В. Новопашина. Материалы 40-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. – М. : ИФЗРАН, 2013. – С. 115–120.
7. Davydenko, A.Y., Grayver A.V. 2014. Principal component analysis for filtering and leveling of geophysical data. J. Appl. Geophys. 109. – Pp. 266–280.
8. Hubert M., Rousseeuw P.J., Van Aelst S. High-Breakdown Robust Multivariate Methods //Statistical Science, – 2008. – Vol. 23. – No. 1. – P. 92–119.
9. Martin Cuma M., Wilson G.A. and Zhdanov M. Large-scale 3D inversion of potential field data // Geophysical Prospecting. – 2012. – Vol. 60. – Issue 6. – P. 1186–1199.



УДК 550.837

И.В. Егоров^{^1}, Н.А. Пальшин^{^2}

УЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВОЛНАМИ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ*

Аннотация. Квазигармонические флуктуации естественного электрического поля, наблюдаемые в мелководных бассейнах в толще воды и на дне порождаются поверхностными волнами. Они могут быть объяснены действием (1) магнитогидродинамических и/или (2) электрокинетических эффектов, с преобладанием вторых на дне пресноводных бассейнов. Развита теория и получены оценки значений шумовых флуктуаций электрического поля для двух основных моделей возбуждения: (1) длинной прогрессивной волной и (2) двумя сталкивающимися волнами любой длины с близкими по величине параметрами.

Ключевые слова: морская электроразведка, электрическое поле, поверхностные прогрессивные волны, стоячие волны, магнитогидродинамические эффекты, электрокинетические эффекты.

Об авторах:

^{^1} К. ф.-м. н., в. н. с., Институт океанологии им П.П. Шириова РАН, Москва, yegorov@ocean.ru.

^{^2} К. г.-м.н., зав. лаб., Институт океанологии им П.П. Шириова РАН, Москва, palshin@ocean.ru

* Работа выполнена в соответствии с государственным заданием № 0149-2014-0031.

I.V. Yegorov, N.A. Palshin

THE ACCOUNTING OF THE ELECTRIC NOISE GENERATED BY WAVES ON THE SURFACE OF THE WATER

Abstract. *The quasi-harmonic fluctuations of natural electric field observed in shallow water in the water column and at a bottom are generated by surface waves. They can be explained by (1) magnetohydrodynamic and/or (2) electrokinetic effects, with predominance of the second one in fresh water. The theory is developed and estimates of electric field fluctuations for two main models of generation of electric noise by surface waves: (1) a long progressive wave and (2) two colliding waves of any length with close parameters are obtained.*

Keywords: *marine electrical prospecting, electric field, surface progressive waves, standing waves, magnetohydrodynamic effects, electrokinetic effects.*

Введение

При измерениях электромагнитных полей, проводимых как при морских электро-разведочных работах, так и при исследованиях прикладного характера, существенной проблемой являются естественные квазипериодические флуктуации электрического поля, учет которых необходим для разработки эффективных технологий измерений и обработки электромагнитных данных, получаемых на мелководных акваториях.

В работе учтён опыт многочисленных многолетних исследований электромагнитных полей, генерируемых морскими волнами. Работы [1, 2, 3, 4, 5] – лишь некоторые из них.

Изучены причины возникновения естественных флуктуаций электрического поля (рассматриваемые как электрические шумы) как на дне, так и в толще воды мелководных частей морей и океанов, а также в озерах и приустьевых частях крупных рек. Источниками этих флуктуаций являются два типа поверхностных волн: (1) длинные прогрессивные волны и (2) стоячие волны любой длины (включая короткие).

В случае волнения, представляющего собой одну прогрессивную волну при длине волны, превышающей удвоенную глубину, пульсирующее давление на дне от пробегающей волны может вызывать электрокинетические эффекты (в пресной воде) в виде электрических полей протекания. Основным фактором является отношение глубины к длине волны. Пульсации давления на дне могут создавать как горизонтальную (вдоль движения волны), так и вертикальную компоненты электрического поля из-за электрокинетического эффекта протекания.

В морской воде под действием сил Лоренца [1] движения индуцируют также горизонтальную (поперек движения волны) и вертикальную компоненты электрического поля, величины которых определяются скоростью движений воды и значениями компонент главного магнитного поля в рассматриваемой географической точке.

Для стоячих волн также возникают обе компоненты градиента пульсирующего давления, что приводит к возникновению двух компонент (горизонтальной и вертикальной) электрокинетического поля. Важнейшей особенностью действия стоячих волн является то, что создаваемые ими пульсации давления распространяются без затухания до дна независимо от глубины [6]. При этом, независимо от глубины, величина электрического поля в пресной воде, обусловленного электрокинетическими эффектами [7], возбуждаемыми стоячими волнами в любом реальном диапазоне длин таких волн, может иметь тот же порядок (при соответствующей крутизне волны), что и поле для длинной бегущей волны при фиксированной глубине [7]. В случае морской воды такой

эффект сталкивающихся волн приводит за счет силы Лоренца к появлению также горизонтальной и вертикальной компонент шумовых флуктуаций электрического поля как на дне, так и в толще воды.

Экспериментальные данные

В 2009–2010 годах ООО «Северо-запад» выполняла методические работы в нескольких мелководных бассейнах, включая Каспийской и Черное моря, а также в пресноводных озерах. Северная часть Каспийского моря часто характерна ветреной и штормовой погодой, поэтому проведение электроразведочных работ методом МТЗ является довольно сложной задачей [8]. Электрическое поле, измеренное в северной части Каспийского моря в слабосоленой воде, характеризуется четко выраженным «волновым» сигналом в обеих компонентах электрического поля (рис. 1а,б).

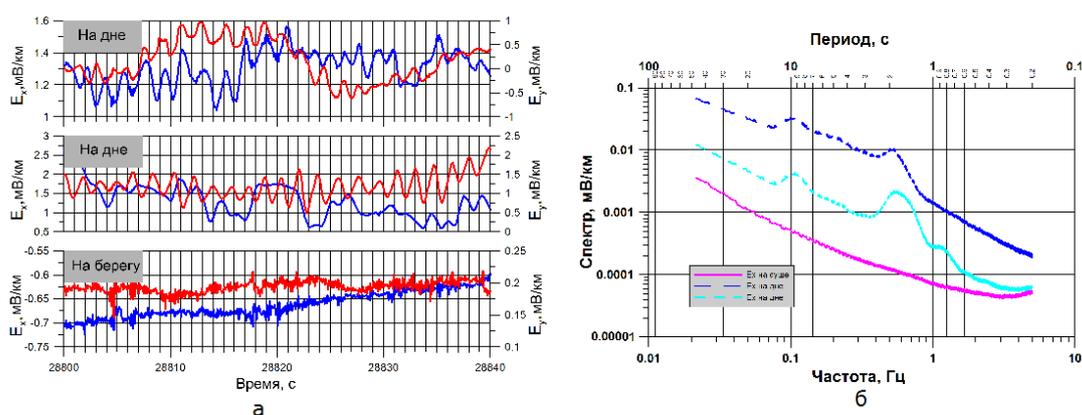


Рис. 1. а) Горизонтальная компонента электрического поля, измеренная на дне в северной части Каспия в практически пресной воде. Верхняя и следующая за ней записи соответствуют двум разным точкам измерений. Для сравнения приведены записи, полученные на берегу. Синим цветом показана северная компонента E_x , а красным – восточная E_y . б) Спектры вариаций электрического поля. Синяя кривая соответствует верхней записи

Электрические поля, измеренные на мелководье [8] в прибрежной зоне Черного моря, также содержат «волновую» составляющую.

Для иллюстрации электрокинетических эффектов на рис 2а,б приведены результаты измерений для озера [8].

Измерения показывают, что интенсивные квазипериодические флуктуации электрического поля наблюдаются в бассейнах с пресной водой, солоноватой и соленой водой для глубин менее 50 метров. Спектры этих полей подтверждают, что ответственны за этот эффект поверхностные волны, поскольку имеют типичный характер поверхностного волнения. В дополнение к сказанному приведем, с согласия М.С. Маловичко, рисунок из его диссертации, на котором видны спектральные особенности измеренного на разных глубинах в ряде регионов электрического поля (рис. 3).

Существуют отдельные свидетельства того, что такие сигналы отмечаются также на больших глубинах [2], но обычно эффект ограничен глубиной 50 м [9].

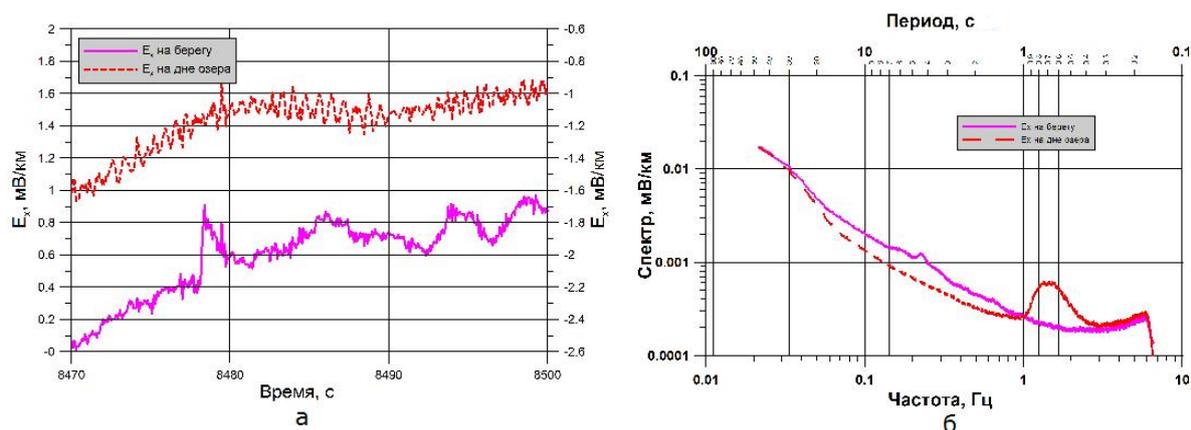


Рис. 2. а) Электрическое поле (верхняя кривая относится к левой шкале, нижняя – к правой) на дне озера Глубокое (Московская область) на глубине 6 м и на земле (заземленные электрические диполи). б) Спектры электрического поля

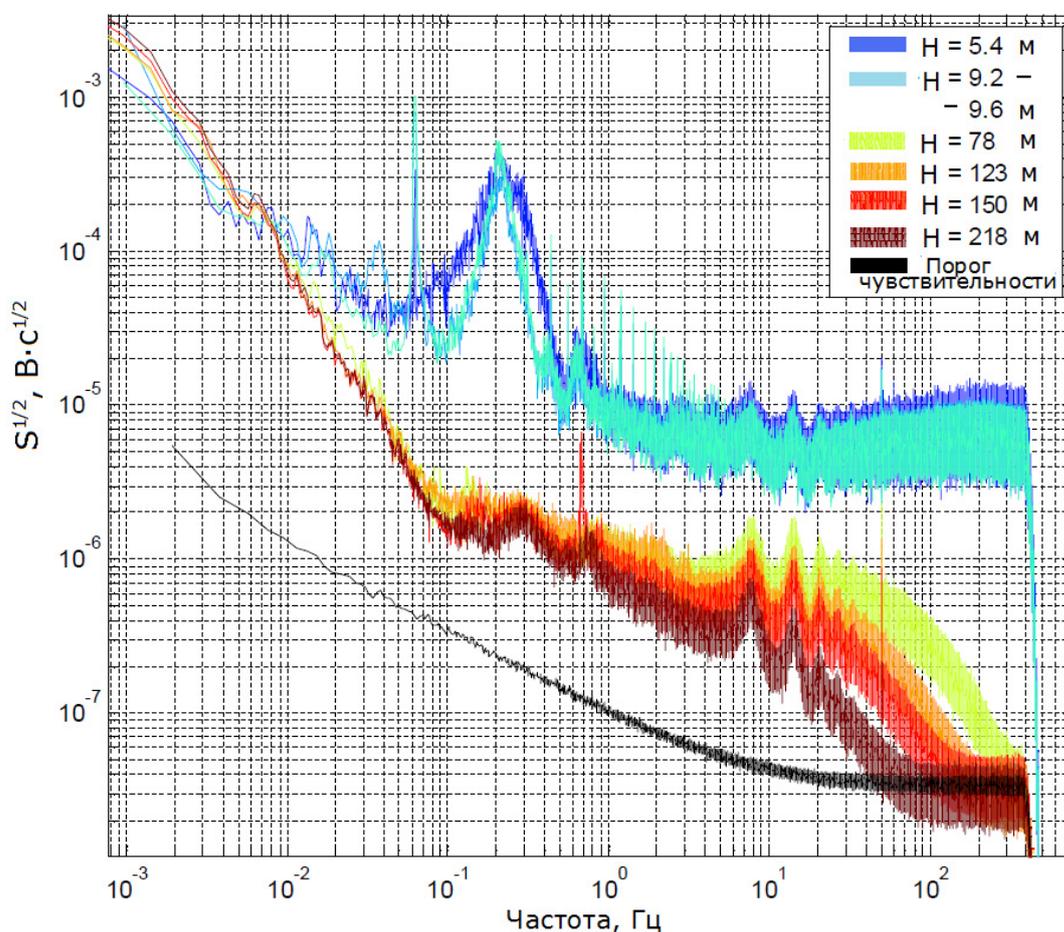


Рис. 3. Зависимость спектрального состава шума от глубины (приведены данные для кабельных систем, полученные в результате многолетних исследований в разных регионах). S – спектральная плотность сигнала, H – глубина

Действие поверхностных волн

Для длинных прогрессивных волн имеем в толще воды [10]

$$p = \frac{\rho h g}{2\omega} \frac{ch k(H+z)}{ch kH} \cos(kx - \omega t),$$

$$V_x = \frac{hgk}{2\omega} \frac{ch k(H+z)}{ch kH} \cos(kx - \omega t), \quad V_z = \frac{hgk}{2\omega} \frac{sh k(H+z)}{ch kH} \sin(kx - \omega t).$$

Для стоячих волн

$$p = \frac{\rho h g}{\omega} \frac{ch k(H+z)}{ch kH} \cos kx \sin \omega t,$$

$$V_x = \frac{hgk}{\omega} \frac{ch k(H+z)}{ch kH} \cos(kx) \cos(\omega t), \quad V_z = \frac{hgk}{\omega} \frac{sh k(H+z)}{ch kH} \sin(kx) \cos(\omega t).$$

Здесь p – давление, V – скорость воды, ρ – плотность воды, H – глубина, h – высота волны, λ – длина волны, $\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh kH$, g – ускорение свободного падения, $k = 2\pi/\lambda$.

Магнитогидродинамические эффекты

При движении проводящей морской воды относительно геомагнитного поля возникает ток индукции, плотность которого имеет вид

$$\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}),$$

причем $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$, $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$, где \mathbf{V} – скорость.

Из результатов [2, 3, 4, 5] следует, что для оценки электрического поля достаточно найти силу Лоренца. В толще воды для двумерных волн, бегущих вдоль направления x :

$$\mathbf{V} \times \mathbf{B} = -V_z B_y \mathbf{i} + (V_z B_x - V_x B_z) \mathbf{j} + V_x B_y \mathbf{k},$$

где \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} – соответственно единичные векторы вдоль осей x , y , z .

Для двумерных волн, бегущих вдоль направления x , имеем на дне

$$\mathbf{E} = \mathbf{V} \times \mathbf{B} = -V_x B_z \mathbf{j} + V_x B_y \mathbf{k}.$$

Так, для расчета скорости движения морской воды на дне под бегущей волной при малых глубинах получаем, с учетом дисперсионного соотношения, формулу:

$$V_x = h \sqrt{\frac{\pi g}{2\lambda ch kH sh kH}}.$$

Например, для абсолютной величины какой-либо из компонент электрического поля в северных широтах: $|\mathbf{E}| = 0,2 \text{ м/с } 15000 \text{ нТ} = 3 \text{ мВ/км}$.

Электрокинетические эффекты

Считая дно, вдоль которого движется вода, стенкой капилляра, используем известную формулу, полученную Гельмгольцем и Смолуховским (см. [11]):

$$\mathbf{E} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \sigma} \text{grad } p,$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, ε_0 – электрическая постоянная, ζ – потенциал, η – вязкость (динамическая) дисперсионной среды, p – давление.

Когда дно имеет неровности, при движении воды возникают завихрения. Такие движения твердых частиц могут приводить к возникновению электрического поля седиментации, которое можно найти, используя следующую формулу [12]:

$$E = \frac{k_1 \varepsilon \varepsilon_0 \zeta n V}{\sigma \eta + 4\pi k_2 (\varepsilon \varepsilon_0 \zeta)^2 r n} \Delta \rho g,$$

где n – концентрация частиц дисперсной фазы, r – радиус частицы, σ – удельная электрическая проводимость дисперсионной среды, $\Delta \rho$ – разность плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды, V – объем частиц. Коэффициенты k_1 и k_2 зависят от формы частиц и соотношения их размеров с толщиной ионной атмосферы двойного электрического слоя.

Оценки

Пользуясь формулой Гельмгольца – Смолуховского, можно оценить электрическое поле, генерируемое поверхностными волнами на дне пресноводных бассейнов.

Взяты следующие значения величин: высота волны h до 0,5 м и длина волны 10 м; дзета-потенциал ζ составляет 0,01, глубина H от 4 м, горизонтальная скорость воды (длинные бегущие волны) на дне около 0,32 м/с.

Горизонтальное электрическое поле, создаваемое электрокинетическим эффектом протекания, оценена на уровне около 0,4 мВ/км при электропроводности воды, равной 0,1 см. Вертикальная составляющая электрического поля получается по меньшей мере на один порядок меньше.

Полученные оценки должны рассматриваться как приблизительные из-за неоднородности придонного слоя и неопределённости его параметров.

В качестве примера было рассчитано электрическое поле в северной части Ботнического залива и в северной части Каспийского моря в районе дельты Волги. Для Ботнического залива горизонтальная компонента электрического поля имеет значение около 1,6 мВ/км, а вертикальная – около 0,4 мВ/км. Для Каспийского моря, соответственно, – 1,4 мВ/км и 0,7 мВ/км. Найдено электрическое поле, создаваемое стоячими волнами за счет электрокинетического эффекта при глубине 40 м. Причем взяты две волны с высотой 0,5 м, но с разными длинами волн, а именно 1,4 м и 4,5 м. Горизонтальное электрическое поле на дне оценивается значением 0,1 мВ/км.

Выводы

Экспериментальные данные, полученные в различных регионах, показывают наличие интенсивных квазипериодических колебаний электрического поля, которые затрудняют измерения электрического поля на мелководье. Такие электрические поля наблюдаются в мелководных частях морей, в озерах и устьевых областях крупных рек.

Рассмотрены две возможные модели генерации электрического поля: (1) длинными бегущими волнами и (2) стоячими волнами (при столкновении двух прогрессивных волн). Длинные прогрессивные волны могут вызывать движение воды и колебания давления в мелководных бассейнах глубиной менее 50 м. Определяющим является отношение длины волны и глубины.

Стоячие волны могут также генерировать колебания давления, величина которого пропорциональна крутизне волны. Причем, наиболее важная особенность заключается в том, что пульсации давления не затухают с глубиной.

Электрическое поле может создаваться с помощью двух механизмов: (1) магнито-гидродинамического и/или (2) электрокинетических эффектов в придонном слое. Второй механизм преобладает в пресноводных бассейнах.

Две компоненты электрического поля (горизонтальная и вертикальная) могут быть индуцированы с помощью электрокинетического и/или магнито-гидродинамического эффектов в толще воды и на дне.

Библиографический список

1. *Podney W.* Electromagnetic fields generated by ocean waves // *J. Geophys. Res.*, 1975. – V. 80. – № 21. – P. 2977–2990.
2. *Cox C., Kroll N., Pistek P., Watson K.* Electromagnetic Fluctuations Induced by Wind Waves on the Deep-Sea Floor // *J. Geophys. Res.* V. 83, No. C1. 1978. – P. 432–441.
3. *Chave A., Filloux J.* Observation and interpretation of the seafloor vertical electric field in the eastern north pacific // *Geophysical Research Letters*. 1985. 12(12). – P. 793–796.
4. *Bindoff N., Filloux J.H., Mulhearn P., Lilley F., Ferguson I.* Vertical electric field fluctuations at the floor of the tasman abyssal plain. *Deep-Sea Research*. 1986. 33(5). – P. 587–600.
5. *Sanford T.B.* Motionally Induced Electric and Magnetic Fields in the Sea. // *J. Geophys. Res.* 1975. – V. 76. – № 15. – P. 3476–3492.
6. *Longuet-Higgins M.S.* A Theory of the Origin of Microseisms // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* – 1950. – V. 243. – № 857. – P. 1–35.
7. *Егоров И.В., Пальшин Н.А.* Возбуждение электрокинетических эффектов на дне мелководья поверхностными волнами // *Океанология.* – 2015. – Т. 55. – № 3. – С. 461–469.
8. *Пальшин Н.А., Яковлев Д.В., Яковлев А.Г.* и др. Природа низкочастотного электрического поля в транзитной зоне. XVIII Международная научная конференция (школа) по морской геологии. ИО РАН. 2009. – Том. V. – С. 105–110.
9. *Haland E., Flekkoy E.G. and Maloy K.J.* Vertical and horizontal components of the electric background field at the sea bottom // *Geophysics*, 2013. 77(1), E1–E8, doi: 10.1190/GEO2011-0039.1
10. *Кочин Н.Е., Кибель И.А. Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. – М. : Физматгиз, 1963. – Ч. 1. – 584 с.
11. *Духин С.С.* Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. – Киев : Наукова думка, 1975. – 248 с.
12. *Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. – М. : Высш. шк., 2004. – 445 с.



УДК 550.379

Е.Ю. Ермолин^{^1}, О. Ингеров^{^2}, А.А. Савичев^{^1}

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АМТ-МВП ПРИ КАРТИРОВАНИИ ЗОЛОТОНОСНЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ НА ЧУКОТКЕ

Аннотация. Комплекс геохимических и геофизических методов применен для поисков эпитермальных золотоносных кварцевых жил в условиях Чукотской тундры (крайний Северо-Восток России). Особенностью изучаемой территории являлся тот факт, что золоторудные жилы не выходят на поверхность и залегают на глубинах не менее 50–120 м. В этих условиях традиционные методы сопротивлений и вызванной поляризации оказались бессильны. В качестве альтернативы летом 2013 г. были применены технологии аудиоманнителлурического зондирования (АМТ) и магнитовариационного профилирования (МВП). Анализ данных АМТ-МВП показал их высокую чувствительность к изменениям геоэлектрического разреза в широком интервале глубин. Анализ разрезов фазы типпера и индукционных векторов позволил надёжно картировать не только хорошо проводящие объекты (зоны метасоматических изменений, пачки пепловых туфов), но и зоны изоляторов (кварцевые золотоносные жилы, неизменённые дайки дацитов и лавы базальтов). В результате работ 2013 г получено наглядное отображение известной золотоносной кварцевой жилы в откликах АМТ-МВП. Спрогнозировано положение её северной части, смещённой на восток. Прогнозируемое положение жилы было успешно подтверждено бурением в начале 2014 г.

Ключевые слова: Эпитермальные золотоносные жилы, магнитотеллурика, типпер.

Об авторах:

^{^1} Национальный Минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург.

^{^2} Phoenix-Geophysics LTD, Торонто, Канада.

E. Yu. Ermolin, O. Ingerov, A. A. Savichev

EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF THE AMTZ-MVP CENTER FOR MAPPING OF GOLD-BEARING QUARTZ VEINS IN CHUKOTKA

Annotation. Complex of geochemical and geophysical methods has been applied to search for epithermal gold-bearing quartz veins in the Chukchi tundra conditions (extreme northeast Russia). A feature of the study area is the fact that zolotorudnye veins do not come to the surface and occur at depths of at least 50–120 m. In these conditions, the traditional methods of resistivity and induced polarization were powerless. Alternatively, in the summer of 2013 audiomagnetotelluric sensing technology (AMT) was applied, and the profiling magnetovariational (IMP). Data analysis AMT-IMP showed their high sensitivity to changes in the geoelectric section in a wide range of depths. Analysis sections and induction phase tipper vectors will reliably mapped not only well-conductive objects (zones of metasomatic alterations, packs ash tuffs), but also areas of insulators (auriferous quartz veins, unaltered dikes and dacite lava basalts). As a result of the work of 2013 a visual display of known gold-bearing quartz veins in the AMT-MEP response was received. The position of its northern part, shifted to the east, has been predicted. The projected position of conductor was successfully validated by drilling in early 2014.

Keywords: epithermal gold-bearing veins, magnetotelluric, tipper.

Введение

За последнее десятилетие значительно возрос объем применения 5-компонентных измерений естественного переменного электромагнитного поля Земли для решения

рудных задач. 5-компонентные измерения реализуют два метода. Первый метод – магнитотеллурическое зондирование (АМТ), основанное на измерении 4-х горизонтальных компонент поля (E_x , E_y , H_x , H_y) [1]. Второй метод – магнитовариационное профилирование (МВП), основанный на измерении 3-х ортогональных магнитных компонент (H_x , H_y , H_z) [6]. Использование в полевой практике с начала 21-го столетия прецизионных треног для установки магнитных датчиков позволило без существенных затрат одновременно реализовать методы АМТ-МВП. Метод АМТ способен хорошо восстанавливать горизонтальную расчлененность разреза. Метод МВП обладает повышенной чувствительностью к вертикальным границам. Поэтому сочетание этих методов позволяет достаточно детально восстановить геоэлектрический разрез, то есть решать довольно широкий круг задач. Кроме того, обработка данных АМТ-МВП легко реализуется совместно.

В данной работе перед АМТ-МВП была поставлена задача поисков эпитермальных золото-серебряных месторождений на Чукотке. Исследуемая площадь расположена в позднемиоценовых вулканиках Охотского-Чукотского вулканического пояса. Упрощенная геология участка работ показана на Рис. 1б. Мощность рудовмещающей толщи составляет до 1300 м. Она состоит из лав порфировых андезитов (РА) и их туфов. Их перекрывают фельзиты (FELS – риолит, дацит-риолит лапиллиевые туфы) и более поздние порфировые микродиориты (Pmd). По простиранию жилы часто контролируются дайками порфировых дацит-андезитов (PDA), реже – дацитов (DAC). Объекты поисков – маломощные (до 3–5 м) малосульфидные кварцевые жилы, имеющие высокие (10–30 ppm) содержания золота и $Ag/Au \sim 12:1$. Площадь делится на две части (Западный и Восточный) крупным разрывным нарушением ССВ-простирания. По данным геохимических съёмок и в результате бурения на участке была локализована крутопадающая кварцевая жила с Au-Ag минерализацией (профили 1 и 2, пикеты 840). Мощность жилы до 3 метров. Глубина до верхней кромки жилы на юге – 100 м, на севере – 120 метров. При разбуривании северной части участка жила была потеряна. Целью работ АМТ-МВП было: 1 – оценить возможности АМТ при картировании известной жилы; 2 – определить положение северной части жилы в плане и разрезе; 3 – дать прогноз положения новых жильных зон.

Полевые работы методами АМТ-МВП были выполнены с использованием 5-канальных автоматизированных регистраторов пятого поколения MTU-5A [4]. Особенностью работ являлось использование прецизионных треног Tri3/30, позволяющих устанавливать магнитные датчики на любом грунте, в любое время года, не причиняя вредного экологического воздействия на окружающую среду. Более подробно методика полевых работ АМТ-МВП рассмотрена в работе [5]. Всего выполнено 297 точек АМТ-МВП по 8-ми профилям и 55 точек MVP по дополнительным профилям. Расстояние между пикетами составляло 40 м, расстояние между профилями 250–400 м. Было задействовано восемь 5-канальных систем (полный вес геофизического оборудования составлял около 600 кг), полный состав экспедиции составлял 10 человек. Слабый уровень естественного ЕМ-поля, характерный для заполярных широт, существенно ослож-

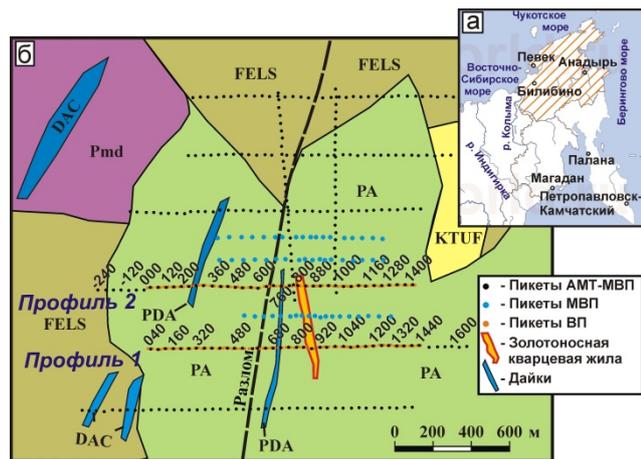


Рис. 24. Геологическая схема участка

нял проведение полевых работ. Все измерения выполнялись по методике с опорным базовым пунктом. Полевые работы, обработка и интерпретация данных АМТ была выполнена в полевом лагере в течение 35 дней. Исследования методами кажущегося сопротивления и вызванной поляризации (ВП) выполнялись с использованием неполяризуемых электродов и регистраторов МТУ-5А. Измерения выполнялись в зоне среднего градиента. Длина генераторного диполя составила 1 км. Длина измерительных диполей и шаг по профилю – 20 м. Результаты ВП и R_k вдоль 2-х профилей показали слабую связь функций отклика с геологическим строением подпокровных отложений (рис. 3 а-I, 3 б-I). В виду этого исследования методами ВП были остановлены.

Анализ данных. Наиболее результативным оказался анализ фазовых параметров АМТ-МВП. На рисунке 2а показана карта фазы эффективного импеданса на частоте 300 Гц. Особое внимание привлекает вытянутая центральная субмеридиональная зона пониженных значений фазы импеданса (профиль 1 и 2, пикеты 800–880). Именно в этой зоне локализована известная (по данным бурения) золотоносная жила (оранжевый цвет). Данная зона пониженных значений фазы импеданса на севере смещается на восток на 80–120 метров. Смещение аномалии пониженных значений фазы импеданса (и результаты 2D инверсии) позволили прогнозировать положение жилы в северо-восточном направлении. Аномалия была разбурена в начале 2014 года и жила с промышленными содержаниями золота была найдена (жёлтый контур на рисунке 2). При

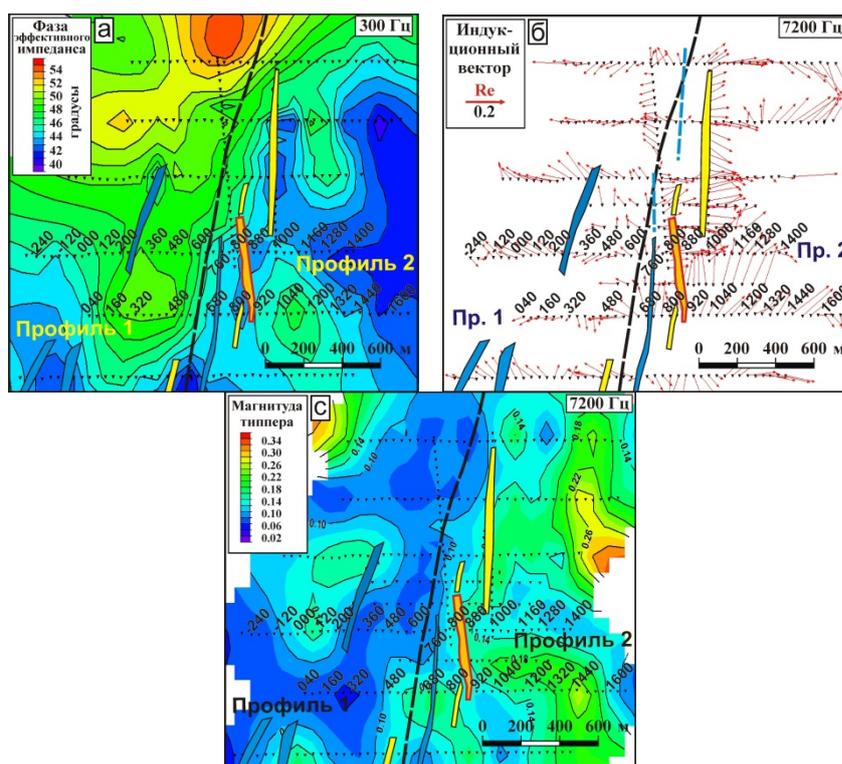


Рис. 25. Карты инвариантной фазы импеданса на частоте 300 Гц (а), индукционных векторов (б) и амплитуды типпера (с) на частоте 7200 Гц (б). Оранжевая жила – данные бурения на 2013 год, жёлтые жилы – результаты бурения 2014 года

рассмотрении карты индукционных векторов на частоте 7200 Гц (рисунок 2б) в южно-центральной части можно наблюдать зону разворота векторов, соответствующую положению известной дайки. Вектора резко меняют свою ориентацию с СЗ на СВ прямо над верхней кромкой дайки. На севере данная зона разворота векторов смещается на

восток на 100–120 метров (прерывистая синяя линия). Данный факт также независимо подтверждает смещение всей структуры на восток в северной части участка. Аномалия пониженных значений фазы импеданса на самом южном профиле не вызвала сильного ажиотажа в 2013 году, т. к. была обнаружена лишь одним профилем АМТ-МВП. Тем не менее, данная аномалия была разбурена в 2014 году и в результате ещё одна золотоносная жила была обнаружена. На карте амплитуды типпера на частоте 7200 Гц (рис. 2с) известные жилы проявляются в градиентных зонах.

Результаты 2D инверсии были получены для всех профилей с совместным использованием кривых кажущегося сопротивления, фазы импеданса (ТЕ-мода и ТМ-мода) в диапазоне частот от 10 000 до 50 Гц и амплитудой типпера в диапазоне частот от 10 000 до 3000 Гц. В среднем, MRS составила 1–1,3 % для всех профилей. Геоэлектрические разрезы вдоль профилей 1 и 2 показаны на рисунке 3 а,б-II. Для наилучшего понимания геоэлектрических разрезов были выполнены измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) основных типов пород участка. Основные результаты обобщены в таблице на рисунке 3 б-V. По результатам этих измерений можно сделать вывод, что основными проводниками на разрезах являются слои туфов и сильно изменённых пород. А зоны повышенного УЭС отвечают андезитовым дайкам и свежим лавам андезитобазальтов.

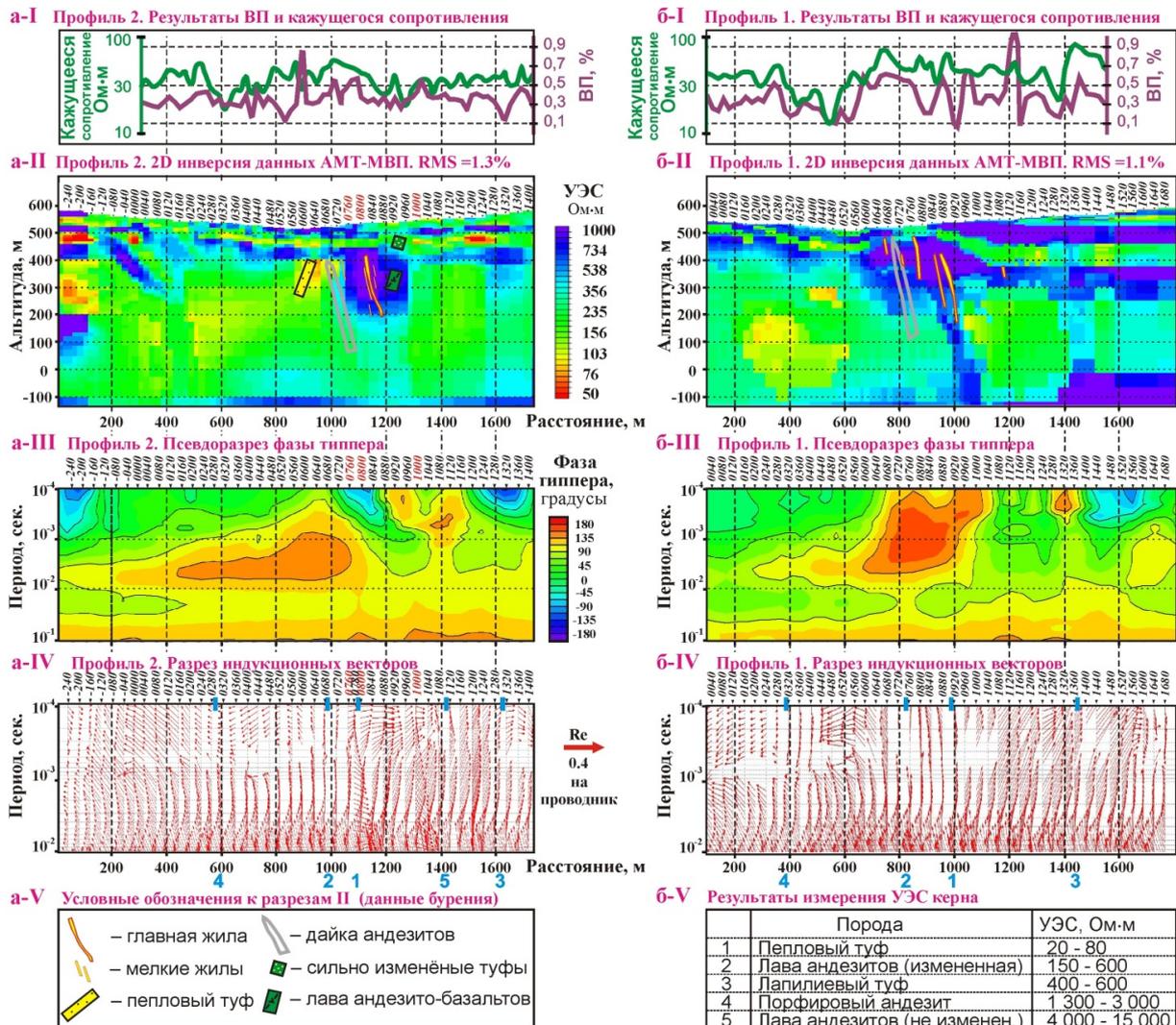


Рис. 26. Сопоставление результатов АМТ-МВП и ВП вдоль профилей 2 (а) и 1 (б). Синие метки вверху разрезов индукционных векторов (а,б-IV) – зоны изолятора

На геоэлектрических разрезах известному положению жильной зоны соответствует зона повышенных значений удельного электрического сопротивления. Причём на разрезе 2 жильная зона узкая и соответствует узкой зоне повышенного сопротивления (пикеты 760–960). На разрезе 1 жильная зона намного шире и соответствует широкой зоне повышенных значений УЭС (пикеты 600–1120). Очень примечателен тот факт, что по падению главной жильной зоны расположен глубинный канал с повышенным значением УЭС. Указанный глубинный канал проявляется на обоих профилях.

Аномальные объекты достаточно хорошо проявляются на разрезах фазы типпера как вертикальные градиентные зоны. Это утверждение было доказано на основании 2D моделирования в предыдущих работах авторов [2, 3]. В результате анализа фазы типпера вдоль профилей 1 и 2 (рис. 3 а, б-III) оказалось, что положение известных жил соответствует вертикальным градиентным зонам. То есть тип кривых фазы типпера резко меняется при прохождении над аномальным объектом. Это видно как на профиле 2 (пикеты 760–880), так и на профиле 1. По градиентным зонам на профиле 1 можно выделить как минимум два аномальных объекта. Первая мелкая жила проявляется на высоких частотах (8000–10000 Гц) при переходе от пикета 760 к пикету 840. Вторая жила, более крупная, проявляется как вертикальная зона градиента фазы типпера на частотах 300–3000 Гц при переходе от пикета 920 к 960.

Помимо известной жильной зоны, следует отметить перспективность ещё как минимум двух зон. На востоке участка профиль 1 (пикеты 1320–1400) и профиль 2 (пикет 1280–1360) пересекают крутопадающую зону повышенного УЭС. Данная зона имеет схожее простирание с известной центральной жильной зоной. Восточной зоне соответствуют ярко выраженные зоны вертикального градиента на псевдоразрезах фазы типпера. Это видно как на профиле 1, так и на профиле 2. Вторая перспективная зона находится на западе (профиль 1, район пикета 320).

Наиболее понятным и простым в плане экспресс-анализа являются разрезы индукционных векторов (рис. 3 а, б-IV). На разрезах индукционные векторы смотрят на проводник, т. е. от диэлектрика. Таким образом, аномальным зонам изоляторов соответствуют зоны разворота векторов (векторы меняют свою ориентацию с запада на восток). Локальным зонам изолятора могут соответствовать зоны уменьшения амплитуды векторов на фоне крупных (региональных) проводников. Выделенные авторами зоны изоляторов вдоль профилей 1 и 2 обозначены голубыми прямоугольниками в верхней части разрезов (рис. 3 а, б-IV) и пронумерованы от 1 до 4.

В первую очередь следует отметить, что положение известной жильной зоны надёжно фиксируется зоной изолятора № 1 как на профиле 1 (ярко выраженный разворот векторов), так и на профиле 2 (локальный разворот векторов между пикетами 780 и 800). Зона изолятора № 2 надёжно показывает положение дацитовой дайки на обоих профилях. Зона изолятора № 3 появляется как локальный минимум амплитуды векторов. Эта зона соответствует выявленной на геоэлектрическом разрезе и по фазе типпера «Восточной зоне». Зона изолятора № 4 хорошо проявляется как точка разворота векторов на профиле 1 и зона ярко выраженного локального минимума индукционных векторов на профиле 2. Следует отметить, что данная зона, хоть и не была выделена в результате 2D инверсии, но именно ей соответствует ось комплексной литогеохимической аномалии, что делает её весьма перспективной. Ярко выраженная зона изолятора № 5, выделенная на разрезе вдоль профиля 2, находится между двумя проводящими объектами в верхней части геоэлектрического разреза и не является перспективной.

Выводы

Применение методики АМТ-МВП позволило определить положение известной, не выходящей на поверхность золотоносной жилы, и спрогнозировать её смещение на восток в северной части площади, что впоследствии было подтверждено бурением. Известные золотоносные зоны выделяются аномалиями повышенного сопротивления в интервале глубин 150–500 м, а также градиентными зонами на псевдоразрезах фазы типпера и точкам разворота индукционных векторов. Крупные жильные зоны имеют узкие глубинные каналы, характеризующиеся высоким значением удельного электрического сопротивления. В результате работ АМТ-МВП на участке было выявлено ещё две потенциальные золотоносные зоны.

Для условий регионов с плохо развитой инфраструктурой и ранимой экологией (таких как Чукотка) технология АМТ-МВП среди геофизических является оптимальной для прогноза маломощных слепых золотоносных кварцевых жил. Существенную роль в производительности измерений играет применение прецизионных треног для установки индукционных датчиков.

Библиографический список

1. *Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I.* [2008] Models and methods of magnetotellurics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. – 563 pp.
2. *Ermolin E., Ingerov O., Ingerov I.* [2014] Evaluation of 3-D ore bodies parameters using tipper frequency response 76-th EAGE Conference and Exhibition 2014, 16-19 June 2014, We P05 10.
3. *Ingerov O., Ingerov I., Ermolin E.* [2013] Mapping of thin conductive dikes and veins overlaid by sediments using methods of Audiomagnetotellurics (AMT) and Magnetovariational Profiling (MVP), SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013: pp. 1601-1605., SEG Houston 2013 Annual Meeting.
4. *Ingerov O. et al.* [2009]. Non-grounded Surface Electroprospecting Technique. 70th EAGE annual Conference. Amsterdam #6149.
5. *Ingerov O., and Ermolin E.* [2011] The results of AMT survey at Patomsky crater. 73rd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2011 – Incorporating SPE EUROPEC 2011, 6. – Pp. 4325–4329.
6. *Rokityansky I.I.* [1982] Geoelectromagnetic Investigation of the Earth Crust and Mantle. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. – 378 p.



УДК 550.8

И.А. Ингеров¹, Т.В. Рудак¹, Е.Ю. Ермолин²

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ (ШЕЛЬФ И ТРАНЗИТНЫЕ ЗОНЫ)

Аннотация. *Донные исследования на мелководных акваториях имеют ряд специфических особенностей. В частности, это сложности с герметизацией аппаратуры, необходимости борьбы с электромагнитными помехами, вызываемыми подводными течениями и волнениями поверхности моря. Еще одной проблемой является невозможность использования во многих районах крупнотоннажных судов. А использование малотоннажных судов вызывает повышенные требования к габаритам и весу аппаратуры. Есть и некоторые положительные аспекты, связанные с возможностью использования надежной акустической связи между донными станциями и судном, а также использованием всплывающих буев с радиомаяком для фиксации места нахождения донной*

аппаратуры. Предлагается морской малоуглубинный комплекс оборудования, позволяющий эффективно использовать стандартную наземную EM аппаратуру для проведения поисковых работ в интервале глубин 0–200 м. Комплекс включает 2-х – 4-х – 5-канальные системы.

Ключевые слова: морское МТЗ, электромагнитное поле, донные станции, шельф и транзитные зоны, запуск с маломерных судов, компактные и легкие донные станции.

Об авторах:

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

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

I. Ingerov, T. Rudak, E. Ermolin

MARINE EM SURVEYS ON COASTAL SHELF AND TRANSITION ZONES

Abstract. *Seabed EM surveys in shallow water environments have a number of specific particularities. Specifically, there is difficulty with hermetical sealing of EM instruments and the necessity of overcoming electromagnetic noise caused by underwater currents and sea surface disturbances. Another problem is the inability to employ large ocean going vessels in many areas, while the use of small vessels increases the demands on the size and weight of the equipment. There are also certain positive aspects in this, pertaining to the ability to use reliable acoustic communication between the marine EM instrument positioned on the seabed and the sea surface, as well as the use of beacons for identifying the location of the bottom apparatus. A shallow marine equipment complex is offered. It allows efficient use of standard ground EM instruments for carrying out investigations at a sea depth interval of 0-200m. This complex consists of 2x – 4x – 5-channel marine EM systems.*

Keywords: *Marine MT, EM field, OBEM equipment, coastal shelf and transition zones, small vessel deployment, small size, low weight OBEM instruments.*

Для глубоководных бассейнов за последние два десятилетия были созданы технологии и аппаратура для выполнения работ магнитотеллурическими методами (МТЗ), а также с контролируемым EM источником. Накоплен богатый положительный опыт в поисках залежей углеводородов в самых различных районах мира [1, 2, 3, 8, 9]. Однако эти же работы выявили ряд проблем в обеспечении рентабельности морских EM исследований. Поскольку аренда судна стоит несколько десятков тысяч долларов в день, для того чтобы сделать стоимость точки EM зондирования приемлемой, приходится одновременно задействовать несколько десятков донных приемников. То есть, работы требуют значительных капитальных затрат (аренда судна, стоимость аппаратуры, содержание полевой команды и т. д.). Поэтому такие работы могут быть рентабельны только при исследовании крупных участков. Другой особенностью глубоководной аппаратуры является ее значительный вес и наличие преимущественно 2-х или 4-канальной системы регистрации EM полей. Крупнотоннажное судно сложно и неэффективно задействовать на мелководье, поэтому в таких условиях значительно эффективней может оказаться использование маломерных маневренных судов. Такая концепция предъявляет повышенные требования к габариту и весу морской аппаратуры. Как было установлено в первой декаде нынешнего столетия, использование вертикальной магнитной компоненты EM поля позволяет получить существенную дополнительную информацию [4, 5]. Этот факт обуславливает желание иметь в составе подводной системы 5-ти или 3-канальные приборы, оснащенные вертикальным магнитным датчиком. При со-

здании мелководной аппаратуры следует также учитывать два существенных фактора, влияющих на качество полевых записей – волнение моря, подводные течения и т. д.

Первые опыты на мелководье с аппаратурой Феникса были выполнены китайскими геофизиками в заливе Бахай в начале нынешнего века [8]. Работы проводились с рыбацкой джонки с растягиванием электрических линий с помощью шлюпок. Несмотря на полученный положительный геологический результат, применяемая методика не выдерживала серьезной критики с точки зрения безопасности проведения работ, метрологии, производительности и себестоимости. В проектировании подводной аппаратуры существует два подхода. Первый из них предусматривает создание цельной станции, включая регистратор ЕМ полей. Второй подход предусматривает использование известных, хорошо себя зарекомендовавших наземных регистраторов и датчиков магнитных компонент ЕМ поля и создание только герметизированных корпусов, систем управления контроля, систем связи и сигнализации, систем всплытия и погружения. Авторы настоящей работы пошли по второму пути. Второй особенностью разработанной авторами аппаратуры является наличие двух градаций аппаратуры, имеющих специфические механические характеристики: аппаратура для транзитных зон (глубина 0–50 м) и аппаратура для шельфа (глубина 10–200 м) [6, 7]. На акваториях с существенно меняющейся глубиной возможно использование 2-х видов аппаратуры совместно.



Рис. 27. а) китайская рыбацкая джонка, используемая компанией ЗПХ как «базовое судно» для проведения морских работ; аппаратура устанавливалась с моторных лодок; б) подготовка аппаратуры сотрудниками ЗПХ на палубе судна

1. Донные системы для транзитных зон

Это наиболее сложный вид морского оборудования, поскольку, с одной стороны, работы с их применением выполняются в экологически чувствительных акваториях и на дне нежелательно оставлять элементы работы этих систем. С другой стороны, этим системам приходится работать в условиях повышенных электромагнитных помех, связанных с морским течением, волнением моря, а также помехами от береговых силовых установок, линий электропередач и от проходящих судов. Отсюда повышенные требования к высоте и обтекаемости корпуса систем (минимальное сопротивление корпуса), недопустимость сброса бетонных плит или других элементов, используемых в качестве сбрасываемых якорей в донных станциях. Высокие экологические требования также исключают использование свинца и его солей в конструкции пористых неполяризующихся электродов. Двухканальная малогабаритная электромагнитная система SMMT была специально разработана, испытана и запущена в производство для проведения работ в мелководных, морских и пресноводных водоемах в глубинном интервале от 0 до 50 м (рис. 2).

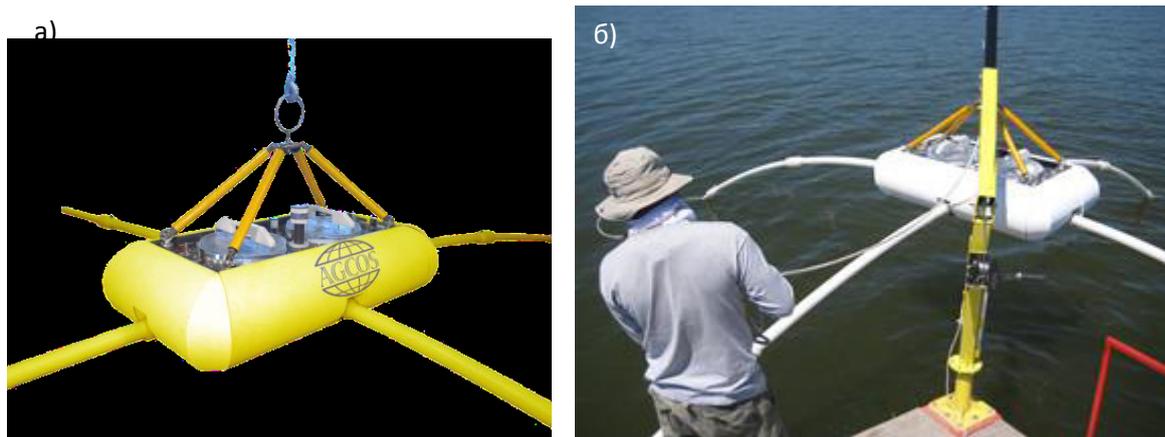


Рис. 28. Морские донные EM станции для работ в транзитных зонах; а) двухканальная система SMMT; б) запуск системы SMMT с палубы катамарана

Важно отметить, что система является также очень удобной для проведения работ на периодически затопляемых территориях (приливные территории, лиманы, нагонная вода). Как уже отмечалось выше, морская система состоит из двух основных частей. Первым является погружаемый герметический модуль с системами всплытия, связи и сигнализации, а также телескопическими электрическими приемными линиями с малошумящими, неполяризуемыми электродами. Вторым существенным элементом системы является многоканальный многофункциональный регистратор EM полей и батарея питания к нему. Система SMMT (2 канала) имеет довольно малую высоту, которая обеспечивает низкое аэродинамическое сопротивление, а также ограниченный вес, позволяющий двум работникам довольно свободно перемещать систему в собранном виде. Система была испытана и показала хорошие функциональные возможности с многофункциональными приемниками: МТУ-2Е, МТУ-5А, Гепард-4, Гепард-8. То есть, система может эксплуатироваться с обычными наземными многофункциональными EM регистраторами, которые выпускаются различными геофизическими компаниями.

Система имеет прочную раму, на которую крепятся обтекаемый корпус, два герметизированных цилиндра, в которых находятся регистрирующий прибор, система связи с сигнализацией и управления, а также батарея питания. Четыре телескопические штанги с неполяризуемыми электродами легко присоединяются и отсоединяются специальными разъемами и замками. В пазах системы находятся элементы специально разработанной экологически чистой системы спуска-подъема. Система имеет 4-кратный запас плавучести. В погруженном состоянии станция задействует акустический модуль связи, а также акустический маяк, рассчитанный на работу не менее месяца в том случае, если устройство акустической связи по каким-то причинам даст сбой. В надводном положении на системе работают радио- и световой маяки, а также радиосвязь. Малые размеры и вес системы, а также съемные телескопические штанги позволяют задействовать с маломерного судна (понтон, катамаран, яхта, буксир) до 10-ти систем. При этом предъявляются весьма умеренные требования к подъемному крану судна (грузоподъемность 0,5 тонн, вынос стрелы за борт судна 2 м).

Запуск системы в работу производится следующим образом. После установки свежих батарей и съемной карты с расписанием регистрации данных герметизируются корпуса, в которых размещено оборудование. Плавсредство выходит в намеченный район, прибор синхронизируется с GPS, активизируются средства связи и сигнализации. Система с помощью крана выносится за борт, последовательно присоединяются штанги электрических линий, система опускается на поверхность воды, производится перезагрузка системы спуска-подъема, и система плавно погружается на морское дно.

В запрограммированное в расписание время система начинает регистрацию EM поля синхронно (по GPS) с другими подводными приборами, а также наземной базовой станцией. Подъем системы, перемещение на следующую точку измерений и спуск производятся в такой же последовательности.

2. Донные системы для шельфа

Донные системы для шельфа рассчитаны работать в глубинном интервале от 10 до 200 м [6, 7]. 2-х и 5-канальные системы представлены на рис. 3а и 3б соответственно. Главным конструктивным элементом каждой системы является рама из прочного немагнитного материала. Пластиковая платформа, прикрепленная к нижней части рамы, является местом крепления основных рабочих элементов системы. К днищу системы крепятся две разъемные сферы, предназначенные для работ на больших глубинах. В одной из них устанавливается регистрирующий прибор (2, 4 или 8 каналов), а также системы управления, связи и сигнализации. Во второй сфере установлены батареи для регистратора EM поля и для каждой из подсистем. Сферы соединены между собой морскими кабелями высокого давления. К плите также прикреплены 4 телескопические штанги с многокамерными, малощумящими, неполяризуемыми электродами. Держатели штанг соединены со сферой регистратора морскими кабелями с разъемами высокого давления. К днищу плиты крепится отстреливаемый бетонный груз, который придает системе отрицательную плавучесть. Донная станция оборудована устройствами акустической связи и сигнализацией, а также системой радиосвязи, которая активизируется при всплытии системы на поверхность. Внутри сфер также находятся датчики, с помощью которых контроллер регистрирует глубину, азимут системы, угол наклона, температуру, влажность внутри сфер и другие параметры. К верхней части рамы крепится комплект буйев для балансировки станции в погруженном состоянии, а также всплывающий по команде буй, содержащий крепкий трос. К раме крепятся регулируемые ноги, которые служат для нивелирования системы на дне и предохраняют систему от присасывания днища к илистому грунту.

В 5-канальном варианте системы, в специальных корпусах, рассчитанных на высокое давление, размещены 3 ортогональных магнитных датчика. Датчики соединены со сферой регистратора магнитного поля глубоководными кабелями высокого давления. По желанию заказчика, на 5-канальную систему может устанавливаться устройство автоматического нивелирования магнитных датчиков. Станции оборудованы основной и аварийной системой всплытия. В основной предусмотрен подъем станции по акустическому сигналу с поверхности с помощью всплывающего буя с тросом. Трос автоматически разматывается по мере всплытия буя. Плавсредство подходит к всплывшему бую, цепляет трос на лебедку крана и поднимает систему за трос на поверхность и далее краном на палубу судна. Если по каким-то причинам произошел отказ в работе всплывающего буя, в аварийном варианте подается акустический сигнал на отстрел бетонной плиты. Так как без бетонной плиты система имеет положительную плавучесть, она с умеренной скоростью всплывает на поверхность. Ограниченные размеры и вес системы (2-канальная – 160 кг, и 5-канальная – 300 кг) позволяют использовать для эксплуатации систем суда относительно небольшого водоизмещения с выносом крана за борт судна на 5 м и грузоподъемностью крана 2 тонны.

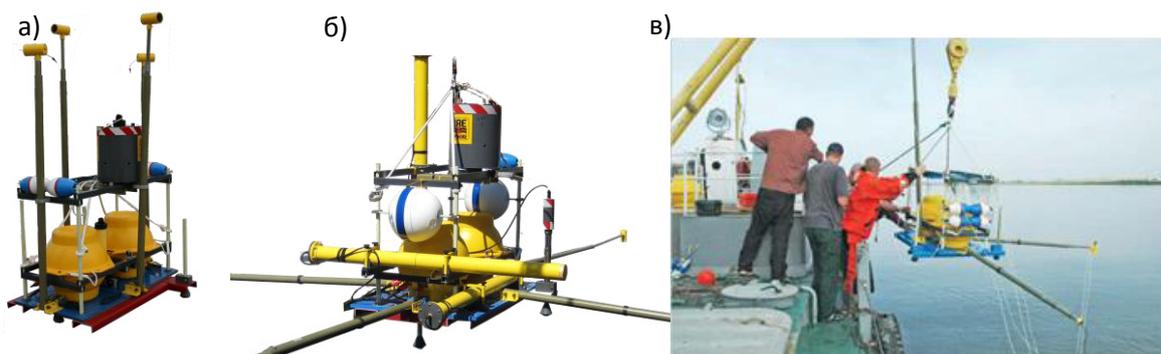


Рис. 29. Морские донные EM станции для работ на шельфе:

а) 2-канальная 2AUSS-07A; б) 5-канальная 5AUSS-07A; в) запуск малоглубинной донной станции в Каспийском море сотрудниками компании Норд-Вест, Москва

Выводы

Созданы и опробованы на практике малоглубинные донные станции для регистрации EM полей. Ограниченные размеры и вес системы, а также их оригинальная конструкция позволят использовать обслуживающую бригаду ограниченного состава (3–5 человек, без учета экипажа судна). Описанные системы позволяют использовать суда небольшого водоизмещения, что значительно сокращает себестоимость работ и маневренность на мелководье.

Библиографический список

1. *Chave A.D.*, et al. Electrical Exploration Methods for the Seafloor, In: Nabighian, M. (Ed) // Investigations in Geophysics, No. 3. – Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. 1991. Vol.2, Application / Parts A and B, SEG publication.
2. *Farely B.*, et al. Remote characterization of hydrocarbon filled reservoirs at the Troll Field by Sea Bed Logging//2004. EAGE Fall Research Workshop, Rhodes, Greece.
3. First Marine MT Survey in Russia // The Phoenix (newsletter of Phoenix Geophysics Ltd.). 2009. Issue #48.
4. *Fox L. and Ingerov O.* Detection of resistivity of offshore seismic structures mainly using vertical magnetic component of earth's naturallyvarying electromagnetic field // 2006. International Patent Application PCT/CA2006/000042.
5. *Fox L. and Ingerov O.* Natural source EM for offshore hydrocarbon detection offers potential cost savings // First Break. Nov. 2007. Vol. 25.
6. *Ingerov I.* Multifunction seabed EM receivers for coastal shelf and transition zones exploration // 22ndEM Induction Workshop, Weimar, Germany. 2014. Extended Abstract.
7. *Ingerov O.* Current trends in the development of electroprospecting hardware set for ground and marine surveys//EMS-2011.St. Petersburg, Russia, Abstracts. – Vol. 1. – Pp. 86–101.
8. Marine MT in China with Phoenix equipment // The Phoenix (newsletter of Phoenix Geophysics Ltd.). 2004. Issue #34.
9. *Vozoff K.* The magnetotelluric method. In: Nabighian, M. (Ed.) // Investigations in Geophysics.1991. No.3 – Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol.2, Application/Parts A and B, SEG publication.



УДК 550.837.211

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

ПЕРВЫЙ ОПЫТ ТРЁХМЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ГАРВАЛЬСКИХ ГИМАЛАЯХ¹

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 Ив. М. Варенцова верифицированы региональными сейсмологическими данными. Представлена прогнозная 3D геоэлектрическая модель региона, составленная с помощью программы R. Mackie, а также предварительные результаты 3D инверсии данных зондирования с использованием кодов W. Siripunvaraporn и G. Egbert, A. Kelbert.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, трёхмерная инверсия, Гималаи/

Об авторах:

^{^1} Геологический факультет МГУ 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 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 results. We present the results of 2D inversion using Iv.M. Varentsov's program along Roorki-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 program of W. Siripunvaraporn program and program by G. Egbert u 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 об-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 10-05-92661_Инд и 13-05-9269_Инд, а также DST (Индия)

разованием 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.

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 Главного 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 кристаллическим сланцами и гнейсами, а также неогеновыми гранитоидами.

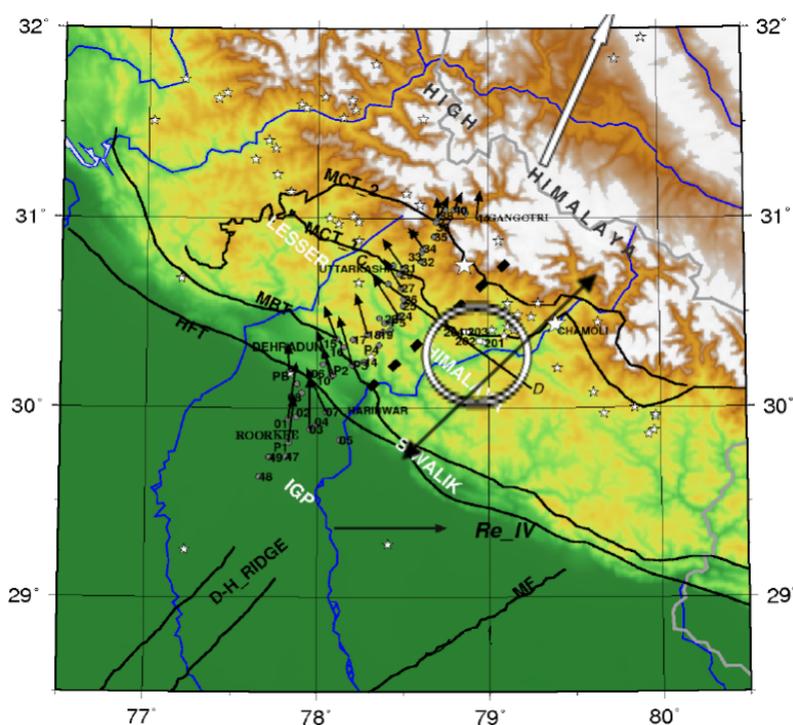


Рис. 30. Точки МТЗ на физической карте изучаемого района. Обозначения рассмотрены в тексте

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 Ив.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.

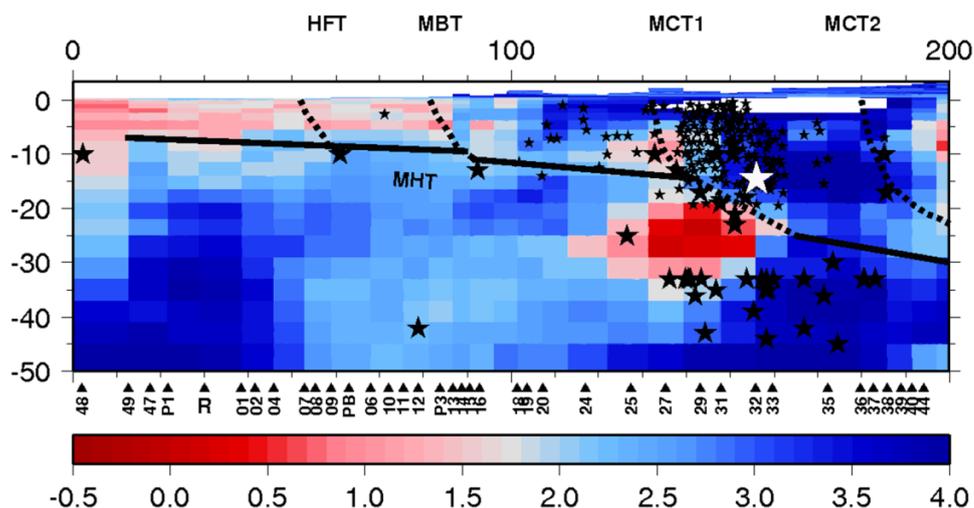


Рис. 31. Геоэлектрический разрез по профилю Рурки-Ганготри (с юго-запада на северо-восток). Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Обозначения рассмотрены в тексте

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 дополнительного 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-нижнекоревых глубинах под Малыми Гималаями в 2D модели (рис. 2). О существовании этой проводящей структуры – Транс-Гималайского проводника (Trans-Himalayan Conductor, ТНС), 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 C-D на рис. 1 отвечает запланированный новый профиль МТ зондирований. В области, выделенной окружностью, белыми квадратами показаны первые 4 точки профиля, выполненные в 2014 году.

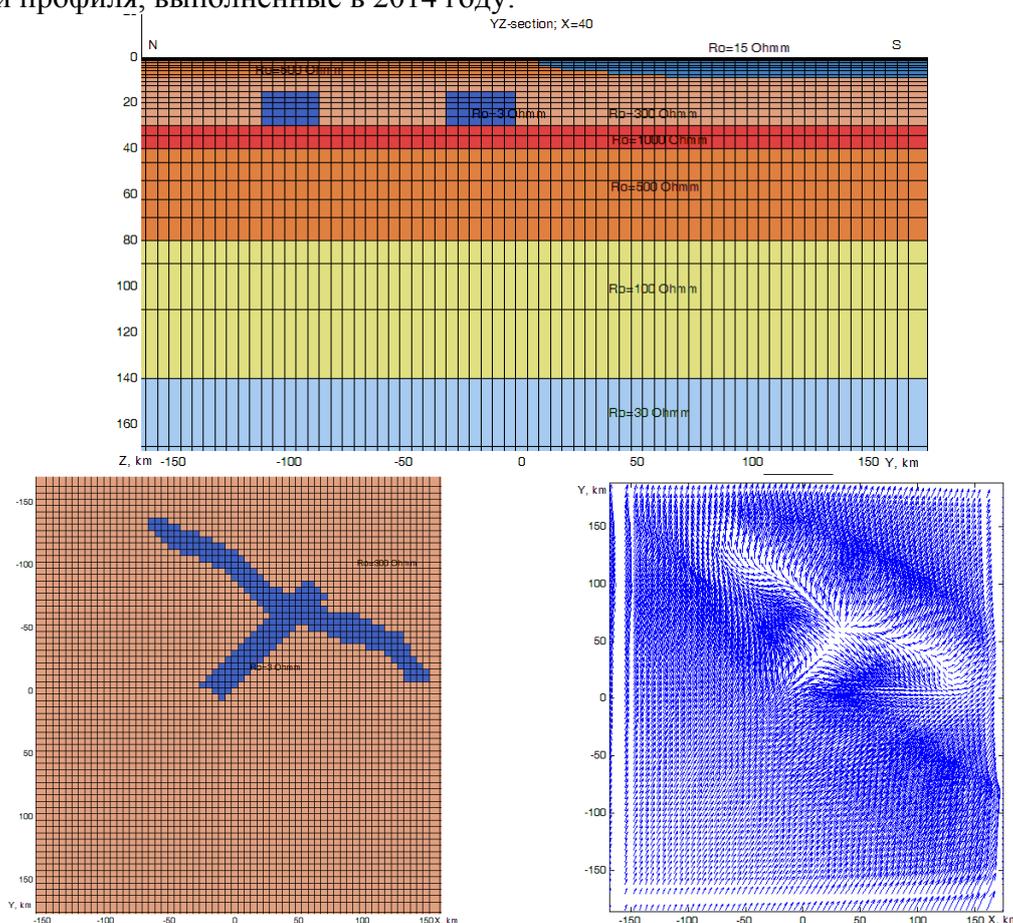


Рис. 32. Прогнозная геоэлектрическая модель Гарвальских Гималаев. Вверху – разрез модели в плоскости $x = 40$ км (с севера на юг), внизу слева – карта на глубине $z = 15$ км, справа – карта индукционных стрелок, рассчитанных на периоде 1000 секунд

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 простираний (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.

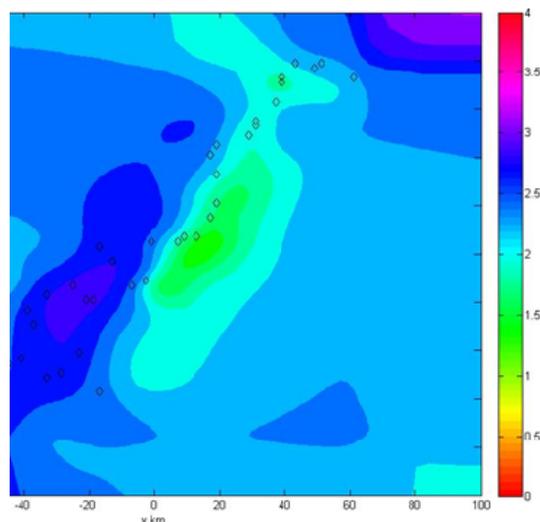


Рис. 33. Карта сопротивления на глубине 22 км, полученная при 3D инверсии по программе [3]. Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Ромбами показаны точки наблюдения

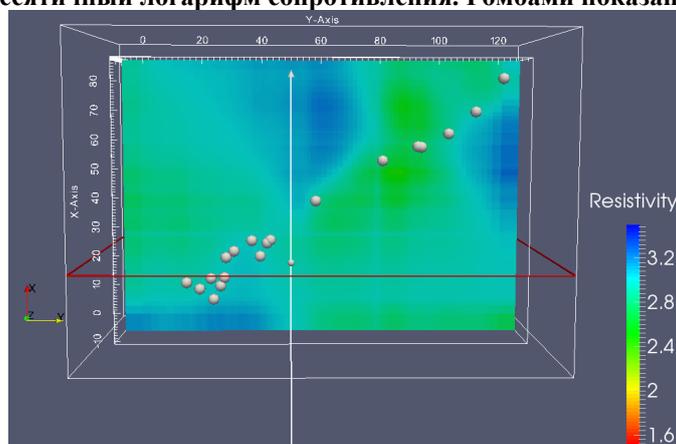


Рис. 34. Карта сопротивления на глубине 20 км, полученная при 3D инверсии по программе [4]. Цветовая шкала – десятичный логарифм сопротивления. Кружками показаны точки наблюдения

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

Библиографический список

1. *Varentsov Iv.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. and Kelbert A.* Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophysical Journal International, 2012, 189. – P. 251–267.



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).

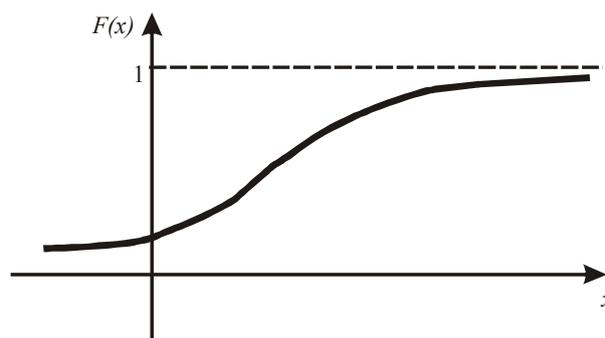


Рис. 1. График $F(x)$ для непрерывной СВ

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 выравнены 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

№ 1 (9)
2016

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск *Е.М. Лыткина*
Редактор *М.Н. Щербакова*

Подписано в печать 30.05.2016. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,0.
Уч.-изд. л. 13,0. Тираж 500 экз. Заказ №

ISSN 2308-6335

Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15