

ВОПРОСЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Научный журнал

№ 4 (12)

2 0 1 6

Редакционная коллегия

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

Редакционный совет

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

Ответственный за выпуск Е. М. Лыткина

Дизайн обложки: В. В. Гасельник

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

Уважаемые читатели!

Напоминаем вам, что журнал публикует статьи по следующим направлениям.

Отрасли науки:

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

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

25.00.00 – «Науки о земле».

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

Электронный вариант журнала можно найти на сайте Иркутского государственного университета путей сообщения <http://irgups.ru>, а также в ЭБС издательства «Лань» по адресу <http://e.lanbook.com>. Аннотации статей на двух языках можно найти на сайте РИНЦ http://elibrary.ru/title_about.asp?id=51245.

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

E-mail: v.estestvozn@gmail.com

Журнал издается с 2013 г.

Периодичность – 4 раза в год.

Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщения

СОДЕРЖАНИЕ

ДЛЯ АВТОРОВ	6
-------------------	---

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Бордачев В. Ю., Плоскова Е. В., Куценко С. М.</i> Реализация алгоритмов модуляции 2B1Q и QAM-16 в программной среде MATLAB.....	9
<i>Гасельник В. В., Макарова Ю. Ю., Черепанова Е. О.</i> Экспериментальное исследование двухчастотных проходных преобразователей	16
<i>Китов Б. И.</i> Спектр рентгеновской трубки после рассеяния на поляризаторе	24

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Некрасова Д. О., Заяц Д. В.</i> Определение ресурсного потенциала и некоторых числовых показателей майника двулистного	33
---	----

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Борняков С. А., Пантелеев И. А., Салко Д. В., Тарасова А. А.</i> Экспериментальная проверка волнового характера реализации деформаций при пассивном механизме Байкальского рифтогенеза	41
<i>Варенцов Ив. М., Иванов П. В., Ковачикова С., Лозовский И. Н., рабочая группа KIROVOGRAD.</i> Массив МТ/МВ-зондирований KIROVOGRAD: квази-3D-инверсия горизонтальных МВ-откликов	47
<i>Варенцов Ив. М., Иванов П. В., Лозовский И. Н., рабочая группа KIROVOGRAD.</i> Массив МТ/МВ-зондирований KIROVOGRAD: от 2D+ к 3D-инверсии на профиле ЖИЗДРА.....	53
<i>Голубцова Н. С., Вагин С. А., Варданянц И. Л., Ковтун А. А., Куликов В. А., Ковачикова С., Лозовский И. Н., Пушкарев П. Ю., Смирнов М. Ю., Соколова Е. Ю., Таран Я. В., Успенский Н. И., Шустов Н. Л., Яковлев А. Г.</i> Новые магнитотеллурические зондирования на профиле «Выборг – Суоярви» через Ладожскую аномалию электропроводности	57
<i>Давыденко Ю. А., Белов В. А., Лаврентьева Н. А., Ткачева К. Ю., Демин А. А.</i> Результаты применения технологии электромагнитных зондирований и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) на Стрельцовском рудном поле	61
<i>Ингерев О., Ермолин Е. Ю.</i> О выборе сети наблюдений 5-компонентных АМТЗ при поисках сульфидных руд	67
<i>Колмаков Ю. В., Потехина Е. В., Колмаков А. Ю.</i> Геодинамические обстановки золотого оруденения Тонодского и Бодайбинского районов (Патомское нагорье, Россия)	73
<i>Спичак В. В., Захарова О. К.</i> Электромагнитный геотермометр – эффективный инструмент разведки геотермальных ресурсов	80
<i>Бычков С. Г., Симанов А. А.</i> Гравиметрические исследования потенциально опасных участков Верхнекамского месторождения калийных солей	85
<i>Митюнина И. Ю., Бычков С. Г.</i> Определение статических поправок по комплексу геофизических методов	92

<i>Снопков С. В.</i> Использование геофизических и геохимических методов при изучении памятников древней металлургии Приольхонья	99
ФОРМА АВТОРСКОГО ДОГОВОРА	103
ФОРМА АНКЕТЫ АВТОРОВ	104
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ	105

ДЛЯ АВТОРОВ

Уважаемые коллеги!

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

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

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

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

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

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

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

7. Не принятые к опубликованию рукописи не возвращаются.

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

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

10. **Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением *.doc** – документа, созданного средствами Microsoft Word 97–2003, и распечатки на стандартных листах формата A4 (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 53.06

В. Ю. Бордачев^{^1}, Е. В. Плоскова^{^2}, С. М. Куценко^{^3}**РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ МОДУЛЯЦИИ 2B1Q
И QAM-16 В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB**

Аннотация. В статье рассматриваются способы кодирования 2B1Q и QAM-16, используемые в системах передачи данных. Алгоритмы методов реализованы в среде MATLAB, где они были применены к цифровым сигналам. Результатами являются графики кодированных сигналов и их спектры, по которым сделаны выводы о преимуществах применения методов.

Ключевые слова: кодирование, модуляция, 2B1Q, QAM-16, скин-эффект, передача информации, xDSL, MATLAB.

Об авторах:

^{^1} Студент группы СОД.3-13-1, ИрГУПС, Иркутск.

^{^2} Студент группы СОД.3-12-1, ИрГУПС, Иркутск.

^{^3} К. т. н., доцент, декан, ИрГУПС, Иркутск, kutsenko_s@irgups.ru.

V. Y. Bordachev, E. V. Ploskova, S. M. Kucenko**2B1Q AND QAM-16 MODULATION ALGORITHMS REALIZATION
IN THE PROGRAMMING ENVIRONMENT MATHLAB**

Abstract. In this article 2B1Q and QAM-16 coding methods used in data transmission systems are analyzed. Algorithms of the methods are implemented in MATLAB environment, where they were applied to digital signals. The results are signals' oscillograms and spectrograms which were used to make insights about the advantages of methods usage.

Keywords: coding, modulation, 2B1Q, QAM-16, skin effect, data transmission, xDSL, MATLAB.

Введение

В современном мире существует множество систем, осуществляющих передачу информации, и каждый из нас так или иначе пользуется ими. На протяжении многих лет эти системы совершенствовались, инженеры разрабатывали новое оборудование, характеристики постоянно улучшались. Так происходит и сейчас. Кроме того, немало внимания уделялось тому, каким образом передавать информационные сигналы, и сейчас существуют различные технологии. Одна из них – довольно популярная в наше время технология xDSL (Digital Subscriber Line) – цифровая абонентская линия, а точнее, семейство технологий, потому что символ «х» обозначает конкретную технологию из семейства (напр. HDSL – High-Bit-Rate Digital Subscriber Line – высокоскоростная абонентская линия). Как известно, существует возможность осуществлять телефонную связь и передачу других данных по абонентской проводной линии (ISDN), а DSL позволяет увеличить пропускную способность абонентской линии. Один из способов достижения этого – использование кодирования сигналов. В технологии DSL используются алгоритмы кодирования 2B1Q (2 binary 1 quaternary) [1] и QAM-16 (Quadrature Amplitude Modulation) [2] (или усовершенствованная его разновидность CAP), которые

и рассматриваются в данной статье. Полный текст (листинг) алгоритмов слишком большой, поэтому в статье будут приведены ключевые фрагменты.

1. Линейный код 2B1Q (2 binary 1 quaternary)

В технологии HDSL [3] применяется алгоритм линейного кодирования 2B1Q. Данный код представляет собой сигнал, который имеет 4 уровня. Последовательность двоичных символов разбивается на группы по 2 символа в каждой, и каждой такой группе присваиваются конкретный кодовый символ и кодовое напряжение (табл. 1) [4, 5].

Таблица 1

Кодовые группы и соответствующие им кодовые символы и напряжения

Кодовая группа	Кодовый символ	Кодовое напряжение
00	– 3	– 2,5 В
01	– 1	– 0,833 В
10	+ 1	+ 2,5 В
11	+ 3	+ 0,833 В

Для наглядности и понимания различия между исходным сигналом и сигналом, кодированным по алгоритму 2B1Q, проведем моделирование в среде MATLAB. На первом шаге формируем случайную последовательность прямоугольных импульсов, имитирующую какое-либо сообщение (рис. 1), где V – количество импульсов; I – генератор случайных чисел от 0 до 1; F_s – частота дискретизации (Гц); N – количество ячеек, описывающих один импульс.

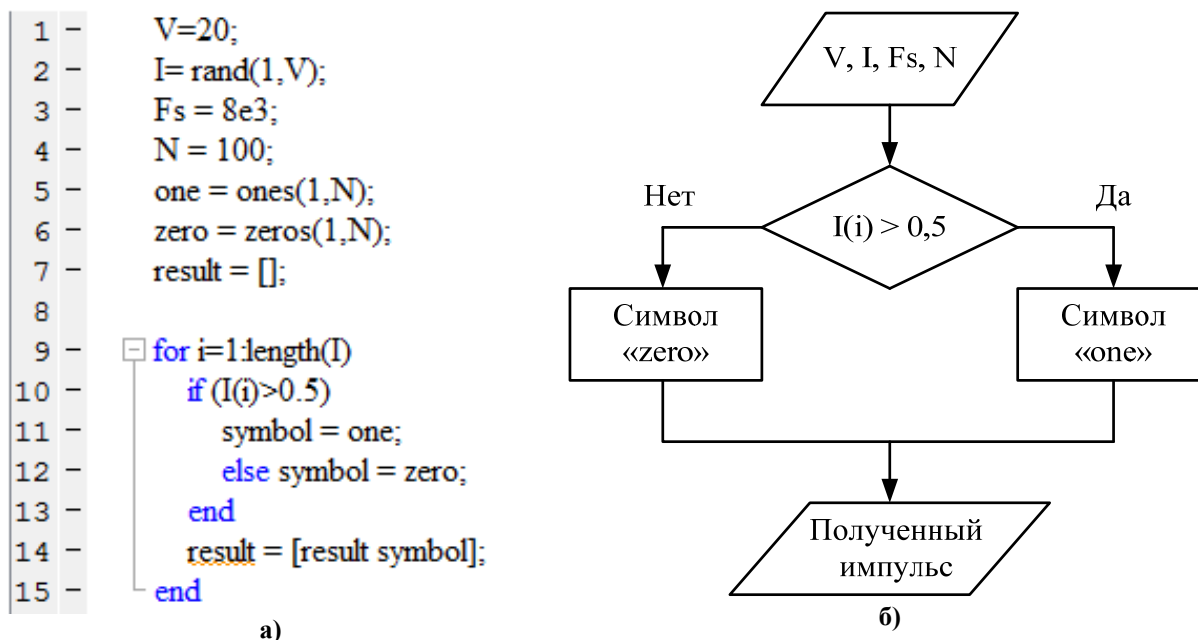


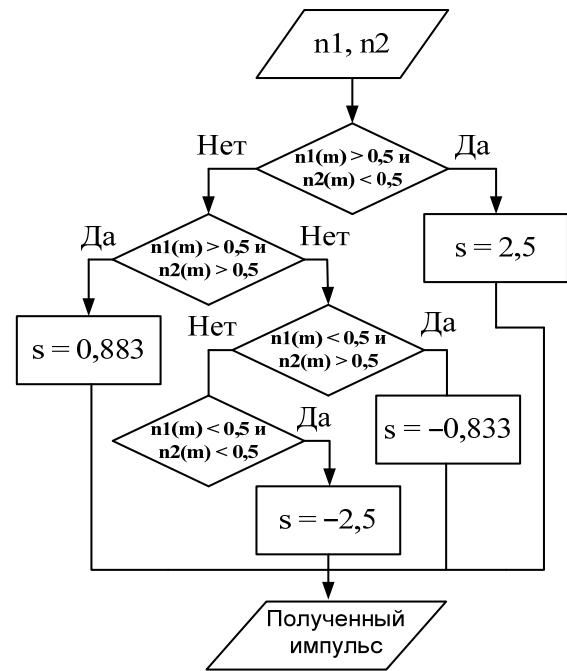
Рис. 1. Команды формирования случайной последовательности прямоугольных импульсов (а) и алгоритм (б)

Далее необходимо из исходного сигнала получить линейно кодированный. С этой целью записываем команды, которые будут реализовывать алгоритм 2B1Q и формировать импульсы кодированного сигнала (рис. 2), используя указанные выше данные (табл. 1).

```

n1 = 1:2*N:N*V;
n2 = 101:2*N:N*V-99;
one1 = ones(1,2*N);
F=[];
for m=1:V/2
    if result(n1(m))>0.5 & result(n2(m))<0.5
        s = one1*2.5;
    elseif result(n1(m))>0.5 & result(n2(m))>0.5
        s = one1*0.833;
    elseif result(n1(m))<0.5 & result(n2(m))>0.5
        s = one1*-0.833;
    elseif result(n1(m))<0.5 & result(n2(m))<0.5
        s = one1*-2.5;
    end
    F=[F s];
end
    
```

а)



б)

Рис. 2. Команды и алгоритм формирования импульсов кодированного сигнала (а) и алгоритм (б)

После приведенных выше действий нужно отобразить получившуюся на первом шаге случайную последовательность прямоугольных импульсов, т. е. исходный сигнал, и сигнал после кодирования. На рис. 3 представлены результаты моделирования.

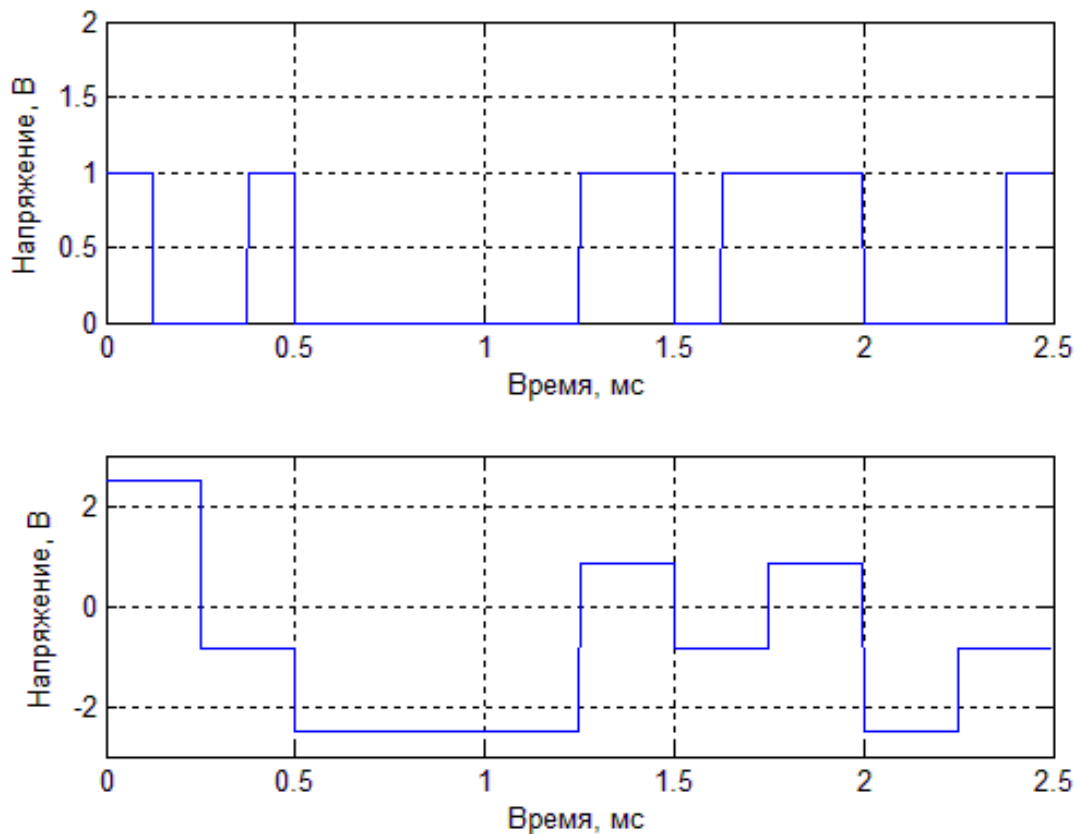


Рис. 3. Осциллограммы исходного (сверху) и кодированного (снизу) сигналов

Из данных рис. 3 хорошо видно, каким образом изменился исходный сигнал. Можно убедиться, что каждые последующие два импульса были преобразованы в один, то есть бодовая скорость ниже битовой в 2 раза, при этом менялась и амплитуда, в зависимости от наличия или отсутствия импульсов в группе и их комбинаций. Битовая скорость – число бит, переданных за 1 с, бодовая скорость – число изменений сигнала за одну секунду. Ниже скорость – меньше диапазон полосы частот.

Далее в среде MATLAB построим спектры сигналов. Для этого нужно записать требуемые команды (рис. 4). В результате получаем спектры исходного и кодированного сигналов (рис. 5).

```
t1=(0:0.00125*pi); % задаем время
dt1 = t1(2)-t1(1); % интервал дискретизации
Fd = 1/dt1; % частота дискретизации
N1 = length(result); % длина сигнала
f = (0:N1-1)/N1*Fd; % вектор частот
```

Рис. 4. Команды формирования спектров сигналов и их отображения

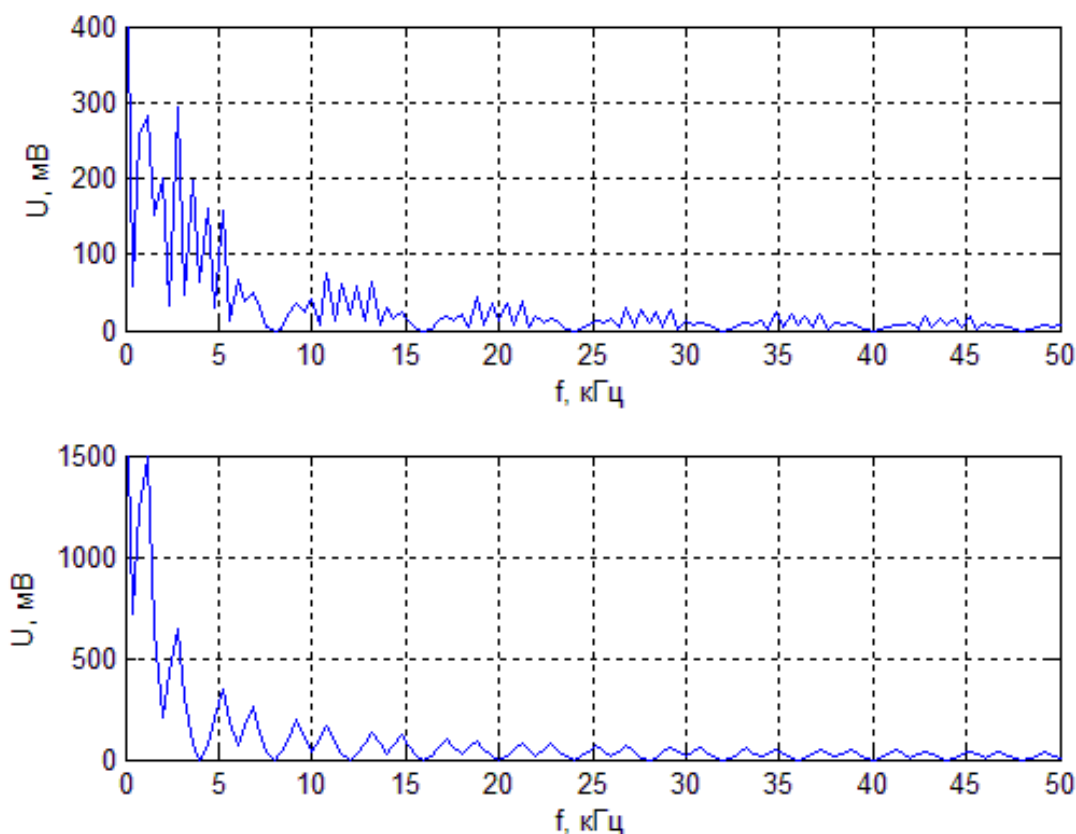


Рис. 5. Спектры исходного (сверху) и кодированного (снизу) сигналов

Из графиков видны изменения спектра кодированного сигнала по сравнению со спектром исходного: основная энергия по-прежнему сосредоточена в области низких частот, однако ширина полосы частот этой области несколько уменьшилась и спектр в целом стал более узкополосным. Это значит, что мы сможем передавать сигнал на большие расстояния.

В проводниках при передаче сигнала наблюдается так называемый скин-эффект (поверхностный эффект) [4]. Сущность явления состоит в том, что при увеличении ча-

стоты тока активное сопротивление проводника растет, а индуктивность уменьшается. Как известно, плотность переменного тока наибольшая у поверхности проводника и она уменьшается к центру. Чем сильнее скин-эффект, тем ближе к поверхности протекает ток и тем меньше его плотность в центре, а неполное использование сечения проводника влечет увеличение активного сопротивления. Например, внутреннее сопротивление R проводника при сильном скин-эффекте

$$R = R_0 \frac{i_0}{i} = R_0 \frac{kr_0}{2}, \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление проводника постоянному току; i – полный переменный ток, протекающий по проводнику; i_0 – постоянный ток, протекающий по проводнику при той же напряженности электрического поля; r_0 – радиус провода; k – волновой вектор

$$k = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}, \quad (2)$$

где j – плотность тока; ω – частота тока; μ – магнитная проницаемость среды; σ – удельная проводимость среды. Таким образом, получаем полное сопротивление

$$Z = \frac{r_0 R_0}{2} (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что внутреннее сопротивление проводника действительно находится в прямой зависимости от частоты протекающего по нему тока. Поскольку при использовании кода 2B1Q уменьшается диапазон частот спектра сигнала, снижается и активное сопротивление проводника при прохождении сигнала по нему (больше используется сечение проводника), значит, потери в линии уменьшаются и сигнал может распространяться на более дальние расстояния.

2. QAM-16 (Quadrature Amplitude Modulation)

Еще один способ кодирования – квадратурная амплитудная модуляция, или QAM, – применяется в технологии VDSL (Very high speed Digital Subscriber Line) [2]. При данной модуляции сигнал кодируется одновременным изменением так называемых синфазной и квадратурной составляющих гармонического сигнала. Эти составляющие сдвинуты друг относительно друга на 90 градусов. Результирующий сигнал образуется путем их суммирования и может быть представлен следующим соотношением:

$$S_m(t) = I_m \cdot \cos(\omega t) + Q_m \cdot \sin(\omega t), \quad (4)$$

где I_m – амплитуда синфазной составляющей, а Q_m – амплитуда квадратурной составляющей, либо

$$S_m(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где A – амплитуда, а φ – сдвиг фазы результирующего сигнала.

Значения амплитуды и фазового сдвига находятся из (3) и (4) соответственно:

$$A = \sqrt{I_m^2 + Q_m^2}, \quad (6)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Q_m}{I_m}\right). \quad (7)$$

Рассмотрим алгоритм QAM-16. Объяснить его суть можно следующим образом. Исходная двоичная последовательность разбивается на группы по 4 бита в каждой. На модуляционной диаграмме для алгоритма (рис. 6) нанесены точки (4 квадранта по 4 точки, 16 точек в целом), и каждая такая точка соответствует определенной группе из

четырёх бит. Вектор, проведенный из начала координат к точке с нужной группой, будет характеризовать сигнал, который можно представить в виде (1), т. е. синусоиды с характерным фазовым сдвигом и амплитудой. Этот сигнал модулирует несущее колебание в соответствии с модуляционной диаграммой [5, 6]. Нетрудно сделать вывод, что при данном способе кодирования цифровой сигнал преобразуется в аналоговый.

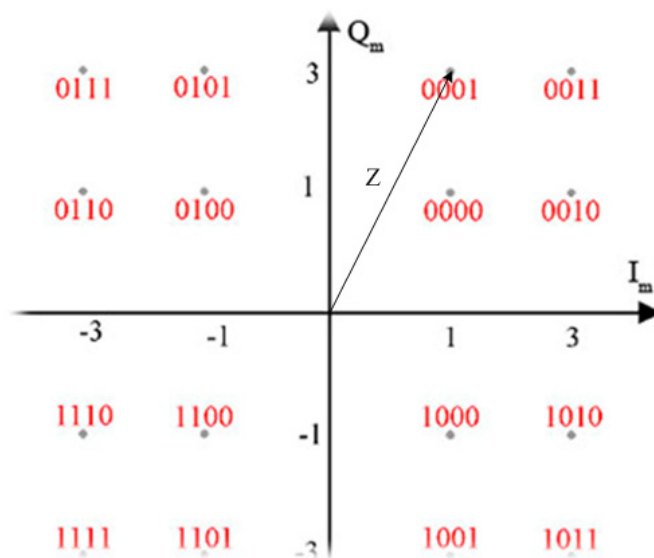


Рис. 6. Модуляционная диаграмма QAM-16

Моделирование QAM-16. На первом шаге нужно создать последовательность случайных импульсов. Поскольку это было сделано выше (рис. 1), только теперь число импульсов V принимаем равным 40, сразу перейдем к формированию модулированного сигнала. Сначала записываем параметры синусоидальных сигналов (рис. 7), которые будут составлять результирующий модулированный. Затем составляем непосредственно алгоритм кодирования (рис. 8), тем самым формируя модулированный сигнал.

```
Mod1=3.2*sin(v*t+0.349066); % синусоида с амплитудой 3.2 и начальной фазой 20 градусов
Mod2=1.4*sin(v*t+pi/4);    % синусоида с амплитудой 1.4 и начальной фазой 45 градусов
Mod3=4.2*sin(v*t+pi/4);    % синусоида с амплитудой 4.2 и начальной фазой 45 градусов
Mod4=3.2*sin(v*t+1.22173); % синусоида с амплитудой 3.2 и начальной фазой 70 градусов
```

Рис. 7. Фрагмент задания синусоид с определенными параметрами

```
% for m=1:V/4 % уменьшение количества импульсов в 4 раза
if result(n1(m))<0.5 & result(n2(m))<0.5 & result(n3(m))<0.5 & result(n4(m))>0.5 % группа импульсов 0 0 0 1
    s = mod4; % заменяется сигналом mod4
elseif result(n1(m))<0.5 & result(n2(m))<0.5 & result(n3(m))<0.5 & result(n4(m))<0.5 % группа импульсов 0 0 0 0
    s = mod2; % заменяется сигналом mod2
elseif result(n1(m))<0.5 & result(n2(m))<0.5 & result(n3(m))>0.5 & result(n4(m))>0.5 % группа импульсов 0 0 1 1
    s = mod3; % заменяется сигналом mod3
elseif result(n1(m))<0.5 & result(n2(m))<0.5 & result(n3(m))>0.5 & result(n4(m))<0.5 % группа импульсов 0 0 1 0
    s = mod1; % заменяется сигналом mod1
```

Рис. 8. Фрагмент команд формирования модулированного сигнала

Для примера: выбранный на рис. 6 радиус-вектор Z реализуется в строке 4 алгоритма (рис. 7) и командой $s = \text{mod}4$ в строке 1 оператора if (рис. 8).

Для остальных групп из четырех бит команды формирования аналогичны. Ниже покажем алгоритм формирования модулированного сигнала для представленного выше фрагмента в виде блок-схемы (рис. 9). Результаты моделирования приведены на рис. 10 далее.

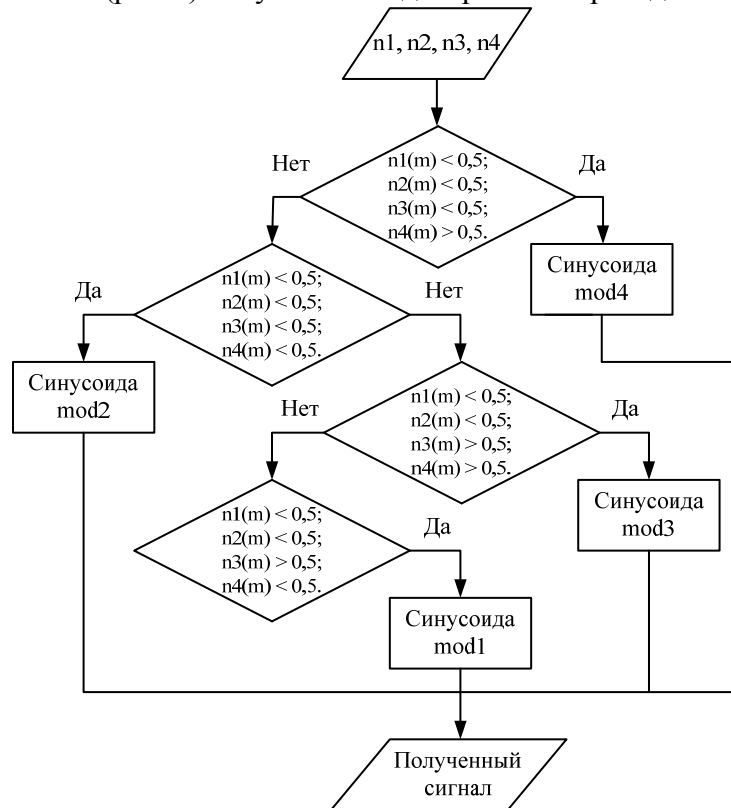


Рис. 9. Алгоритм формирования модулированного сигнала

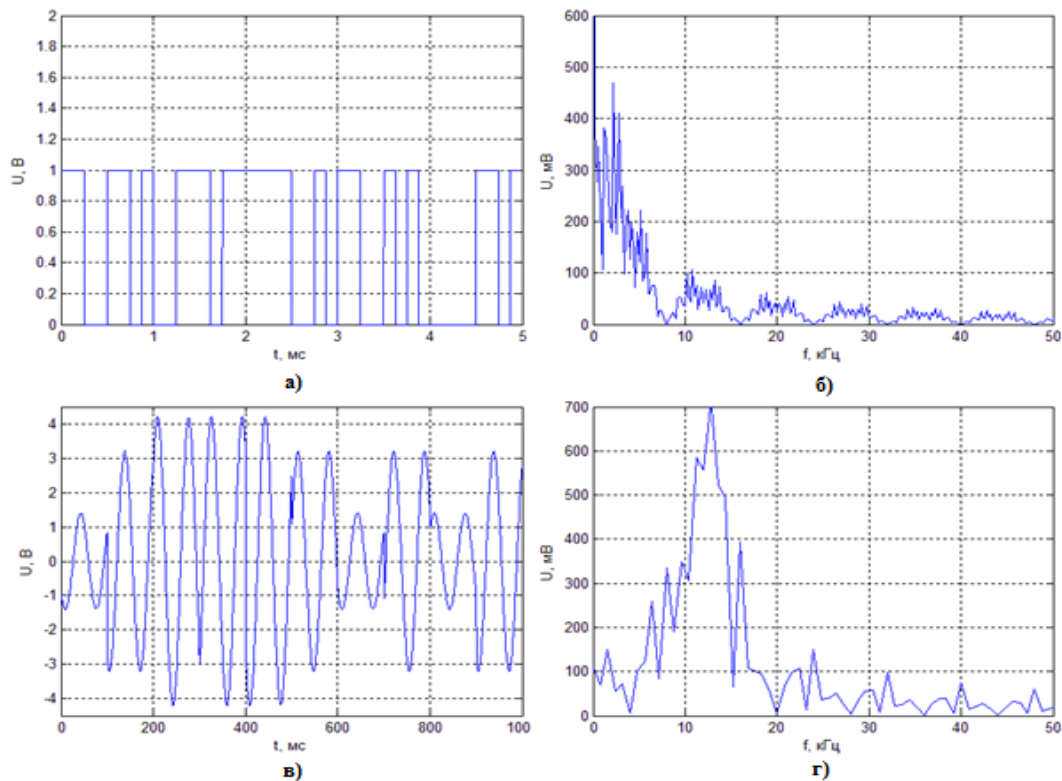


Рис. 10. Исходный сигнал (а) и его спектр (б), модулированный сигнал (в) и его спектр (г)

По видам сигналов можно сделать вывод, что в каждый момент времени модулированный сигнал передает 4 бита информации, то есть бодовая скорость ниже битовой в 4 раза. Из анализа спектров сигналов видно, что основная энергия модулированного сигнала сместилась в область более высоких частот, что означает отсутствие чувствительности к низкочастотным наводкам и искажениям. Отсутствие постоянной составляющей в спектре после QAM-модуляции позволяет сделать вывод, что сигнал QAM не создает помех в спектре сигнала тональной частоты (0,3–3,4 кГц).

Заключение

Было произведено моделирование алгоритмов кодирования 2B1Q и QAM-16, используемых в технологии xDSL, в программной среде MATLAB. Моделирование позволяет наглядно показать их преимущество при передаче информации в сравнении с традиционными линейными кодами, например NRZ (код «без возвращения к нулю», единица соответствует наличию импульса, 0 – его отсутствию). Основными достоинствами данных методов являются: увеличение дальности передачи информации с использованием уже существующих проводных линий, устойчивость к низкочастотным помехам и отсутствие влияния на соседние каналы тональной частоты, в случае с QAM, простота алгоритмов и их реализации.

Библиографический список

1. T1E1.4/98-004R2 DRAFT ANSI T1.601-1998 // American National Standard for Telecommunications – Integrated Services Digital Network (ISDN) Basic Access Interface for Use on Metallic Loops for Application on the Network Side of the NT (Layer 1 Specification).
2. ITU-T Recommendation G.993.1 // Very high speed Digital Subscriber Line transceivers.
3. ITU-T Recommendation G.991.1 // High bit rate Digital Subscriber Line (HDSL) transceivers.
4. Виноградов В. В. Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Виноградов, С. Е. Кустышев, В. А. Прокофьев. – М. : Маршрут, 2002. – 416 с.
5. Попов Г. Н. Телекоммуникационные системы передачи PDH и SDH. Часть I. Основы построения PDH : учеб. пособие / Г. Н. Попов. – 2-е изд. – Новосибирск : СибГУТИ, 2006. – 262 с.
6. Филимонов А. Алгоритмы модуляции технологий xDSL. – URL: <http://lectures.net.ru/xdsl/ofdm>.



УДК 620.179.14:621.3.087.9:537.61.3

В. В. Гасельник¹, Ю. Ю. Макарова², Е. О. Черепанова³

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ ПРОХОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Экспериментальным путем исследованы различные конструкции двухчастотных проходных преобразователей, что позволяет выбирать оптимальную их геометрию и размеры. В частности, рассмотрены результаты исследований влияния коэффициента заполнения, поперечного смещения образца, концевой эффе́кта и базового расстояния дифференциального преобразователя.

Ключевые слова: дефектоскопия, двухчастотный метод, неразрушающий контроль.

Об авторах:

¹ К. т. н., доцент кафедры «Физика, механика и приборостроение», ИрГУПС, Иркутск, gasvv@yandex.ru.

^{^2} Студентка магистерской подготовки кафедры «Физика, механика и приборостроение», ИрГУПС, Иркутск, 8950127313818@mail.ru.

^{^3} Студентка магистерской подготовки кафедры «Физика, механика и приборостроение», ИрГУПС, Иркутск, katin.cherepanova@yandex.ru.

V. V. Gaselnik, Y. Y. Makarova, E. O. Cherepanova

EXPERIMENTAL STUDY OF DUAL-FREQUENCY FLOW SENSORS

Abstract. *Different designs of dual-frequency flow sensors are investigated experimentally, which allows to choose the optimal geometry and dimensions. In particular the results of researches of influence of the fill factor, the lateral shift of the sample, the end effect and the differential converter basic distance are considered.*

Keywords: *flaw detection, dual-frequency method, non-destructive testing.*

Введение

При конструировании приборов электромагнитного контроля важное место отводится выбору конструкции и электрических параметров преобразователя. От этого зависит чувствительность прибора к измеряемому параметру, его разрешающая способность. В методе вихревых токов этому вопросу уделено много внимания. В достаточной степени разработаны различные конструкции преобразователей, предназначенных для решения тех или иных задач. Определены связи между их конструктивными и электрическими параметрами. Созданы новые типы высокоэффективных вихретоковых преобразователей [1–4].

Намагничивание контролируемого изделия при двухчастотном методе контроля осуществляется двумя самостоятельными источниками магнитного поля. Низкочастотное поле должно быть по величине достаточным для изменения магнитных свойств образца вплоть до состояния, близкого к насыщению. Поле высокой частоты на 2–3 порядка меньше низкочастотного. Большое различие величин намагничивающих полей определяет, в свою очередь, относительные размеры возбуждающих катушек.

Сильное поле низкой частоты может быть создано соленоидом или катушками Гельмгольца, обеспечивающими в зоне расположения высокочастотных катушек равномерное магнитное поле. Это требование особенно важно при контроле дефектов дифференциальными датчиками, включенными по схеме самосравнения. Неоднородность низкочастотного поля в зоне контроля приводит к нарушению симметрии намагничивания и, как следствие, к большому уровню начальной некомпенсации.

Высокочастотные катушки имеют малое число витков и геометрические размеры, соизмеримые с поперечными размерами контролируемых протяженных изделий. Форма высокочастотных катушек может быть различной. При контроле физико-механических свойств, когда требуется оценка интегральных характеристик на некотором участке образца, они выполняются распределенными (как возбуждающие, так и измерительные) для исключения влияния резко выраженных неоднородностей локального характера. При контроле дефектов высокочастотные катушки должны локализовать место контроля. Поэтому их ширина должна определяться размером дефектов, подлежащих выявлению.

Многие исследователи в качестве возбуждающих высокочастотных катушек используют двойные укороченные катушки, расположенные друг от друга на расстоянии их радиуса (катушки Гельмгольца). Однородное возбуждающее поле дает

возможность уменьшить влияние на выходной сигнал поперечного смещения образца в датчике [5, 6].

Такая рекомендация может быть использована и при выборе конструкции возбуждающих высокочастотных катушек в двухчастотном датчике. Принципиально для создания однородного поля можно применить катушку соленоидального типа. Однако последние, создавая ту же величину напряженности поля, имеют более значительные индуктивности намотки и распределенную межвитковую емкость. Большая собственная индуктивность затрудняет получение режима заданной напряженности, а наличие большой распределенной емкости нежелательно при работе на повышенных частотах. Поэтому в основу создания возбуждающих катушек положена конструкция двойных колец Гельмгольца.

Исследования поля, создаваемого такими катушками, показали, что при отсутствии образца однородное поле наблюдается во всем объеме между серединами катушек. Помещение в датчик ферромагнитного изделия искажает картину распределения поля. Для получения необходимой однородности поля в этом случае оптимальным является расстояние между катушками, равное примерно $0,8R$ (для коэффициента заполнения $\eta = 0,6$). Между секциями возбуждающей катушки расположена короткая измерительная катушка. В случае дифференциального датчика измерительная катушка состоит из двух секций, расположенных на вполне определенном расстоянии друг от друга и включенных встречно. При этом возбуждающие катушки целесообразно выполнять трехсекционными.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований по воздействию некоторых факторов на выходные параметры двухчастотных датчиков, которые позволяют уяснить их влияние при контроле, а также выбрать правильные размеры катушек преобразователя. В качестве измеряемой величины исследовалось среднее значение второй гармоники высокочастотного спектра.

1. Влияние коэффициента заполнения η

На рис. 1 представлены зависимости, показывающие влияние коэффициента заполнения на величину сигнала абсолютного датчика. Исследования проводились изменением конструктивных размеров датчика при постоянстве сечения испытуемых изделий.

Полученные результаты показывают, что при постоянстве ампервитков возбуждающих катушек уменьшение коэффициента заполнения приводит к понижению значения выходного сигнала. Это понижение резко выражено в области малых значений η . Зависимости так же не остаются постоянными для различных амплитуд низкочастотного поля.

Если же поддерживать постоянной величину высокочастотного поля на поверхности образца, то наибольшее отклонение выходного сигнала при изменении η в пределах $0,1 + 1,0$ не превышало 10 % (на рис. 1, *a* – заштрихованная область). Этот разброс может быть обусловлен погрешностью экспериментальной установки, погрешностью поддержания стабильной величины высокочастотного поля на поверхности образца, а также неидентичностью изготовления измерительных катушек.

Аналогичный результат может быть получен, если диаметр возбуждающих катушек оставлять постоянным, а изменять только диаметр измерительной катушки, выполняя при этом условия $D_{K2} \leq D_{K1}$ (рис. 2, *б*). Превышение диаметра измерительной катушки над возбуждающими ($D_{K2} > D_{K1}$, рис. 2, *в*) приводит к ниспадающей до нуля

(рис. 1, б) зависимости при уменьшении η . Так же, как и в предыдущем (рис. 1, а) случае, ход этих кривых зависит от амплитуды низкочастотного поля.

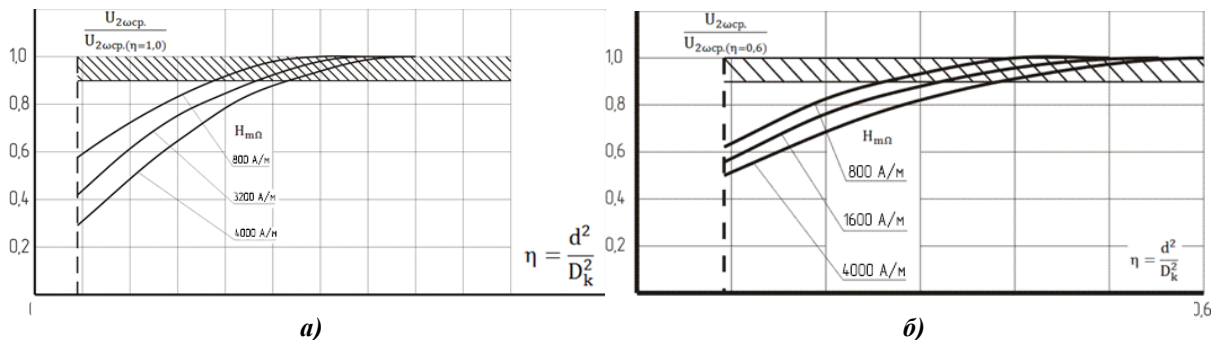


Рис. 1. Влияние коэффициента заполнения на величину среднего значения второй гармоники $U_{2\omega_{ср}}$

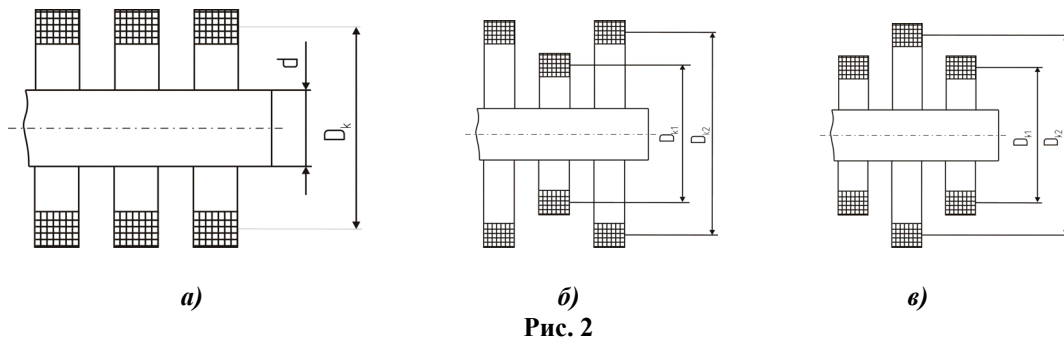


Рис. 2

2. Влияние поперечного смещения

Поперечное смещение изделия в датчике приводит к нарушению симметрии поля, к его неоднородности, а это, в свою очередь, к изменению сигнала преобразователя. В двухчастотном датчике поперечное смещение изделия ограничивается диаметром высокочастотных катушек. Так как размеры последних значительно меньше размеров низкочастотных, то основное влияние на выходной сигнал будет обусловлено взаимным перемещением изделия относительно только высокочастотных катушек. Результаты исследований по влиянию поперечного смещения изделия на сигнал абсолютного преобразователя показаны на рис. 3.

Зависимости носят монотонно-возрастающий характер при сближении образца с витками катушки. Как следовало ожидать, это влияние заметно возрастает при уменьшении коэффициента заполнения (рис. 3, а) и при увеличении напряженности низкочастотного поля (рис. 3, б). Испытания датчика с дифференциальным включением измерительных катушек показали значительно уменьшенное влияние смещения.

При $\eta = 0,2$ и $H_{m\Omega} = 800, 2400, 4000 \text{ A/м}$ и при прочих равных условиях наибольшие отклонения для них составляли соответственно 10, 15 и 17 % и были еще меньше при увеличении коэффициента заполнения.

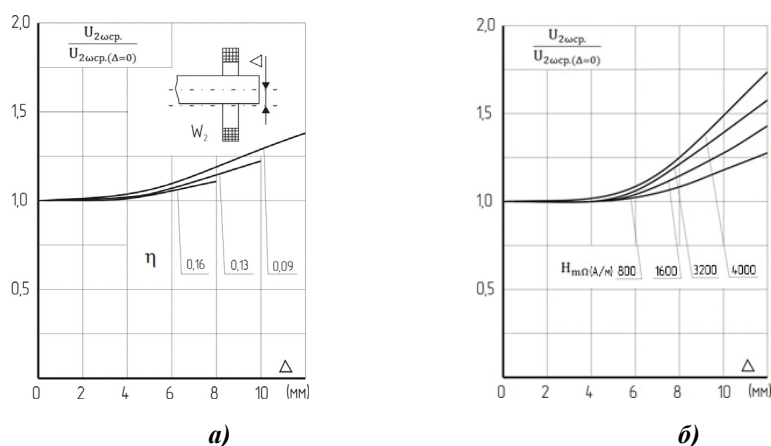


Рис. 3. Влияние поперечного смещения изделия на величину среднего значения второй гармоники $U_{2\omega cp}$.

Анализ полученных данных по исследованию влияния коэффициента заполнения, а также поперечного смещения показывает, что при конструировании высокочастотной части преобразователя необходимо придерживаться мнения об использовании по возможности наибольшего коэффициента заполнения с соблюдением условия $D_{k2} \leq D_{k1}$. Использование датчика самосравнения, а также механических центрирующих устройств может практически полностью исключить влияние поперечных колебаний прутка. Опыт показывает, что даже при отсутствии центрирующих шайб и с использованием катушек с $\eta = 0,4$ роль колебаний прутка в формировании шумовых сигналов незначительна.

3. «Концевой эффект» при двухчастотном контроле

При контроле протяженных ферромагнитных изделий типа стержней, труб, штанг и т. д. проходными датчиками приходится принимать во внимание тот факт, что выходной сигнал датчика зависит от места расположения последнего относительно конца изделия. Эта зависимость определяет величину непроверяемого участка. Влияние края объясняется наличием сильного размагничивающего фактора торца изделия, который определяется размерами катушек, сечением образца, а также частотой и амплитудой поля возбуждения.

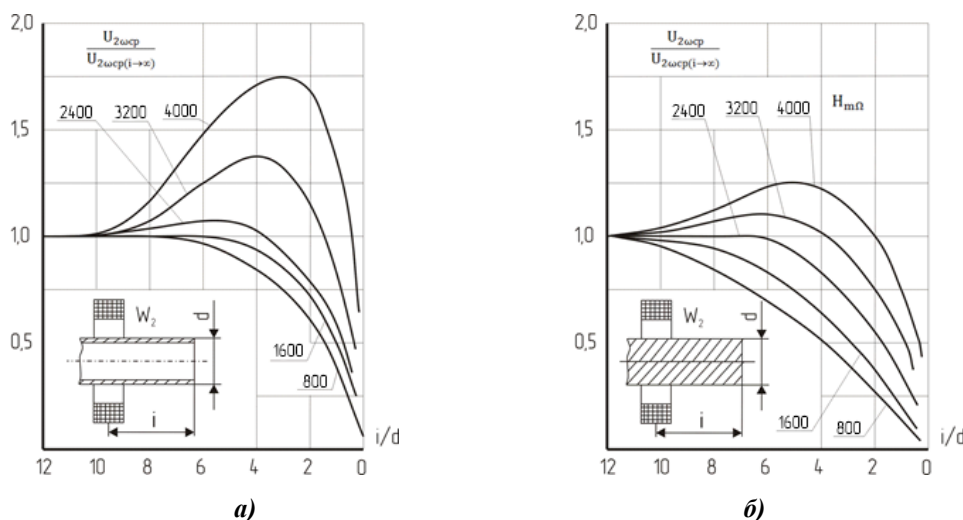


Рис. 4. Влияние края изделия на величину $U_{2\omega cp}$ абсолютного двухчастотного датчика

При намагничивании образца двумя полями равных частот основным при формировании указанных зависимостей должно стать наличие сильного низкочастотного магнитного поля, в отношении которого размагничивающий фактор проявляется наибольшим образом. С целью получения необходимых данных проведены исследования, результаты которых показаны на рис. 4.

Влияние края трубы (рис. 4, а) и прутка (рис. 4, б), диаметром 14 мм, выполненных из одного материала, на входной сигнал абсолютного датчика в сильной степени определяется величиной поля $H_{m\Omega}$. Характерный ход кривых с явно выраженным максимумом при больших значениях $H_{m\Omega}$ объясняется экстремальной зависимостью среднего значения второй гармоники от амплитуды этого поля. Нетрудно оценить длину неконтролируемого участка, зная зависимость $U_{2\omega\text{ср}} = f(H_{m\Omega})$ и закон распределения тангенсальной составляющей низкочастотного поля на поверхности изделия по его длине.

Из графиков (рис. 4, а, б) видно, что с увеличением площади сечения, приводящим к возрастанию размагничивающего фактора, неконтролируемый участок увеличивается. Для дифференциальных датчиков (рис. 5, а, б) участок, где начинаются заметные изменения сигнала, несколько сокращается, но кривые идут более круто.

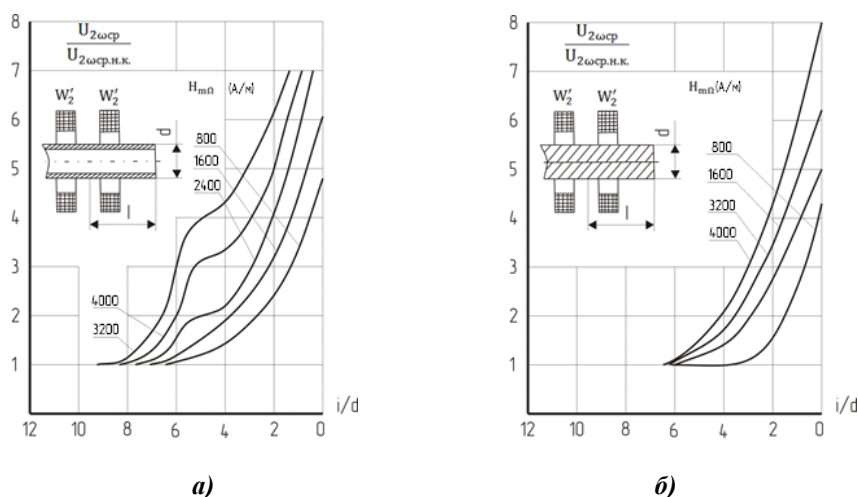


Рис. 5. Влияние края изделия на величину $U_{2\omega\text{ср}}$ дифференциального двухчастотного датчика

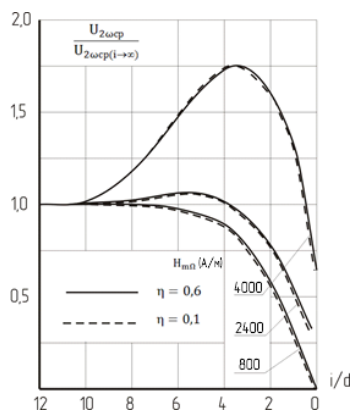


Рис. 6

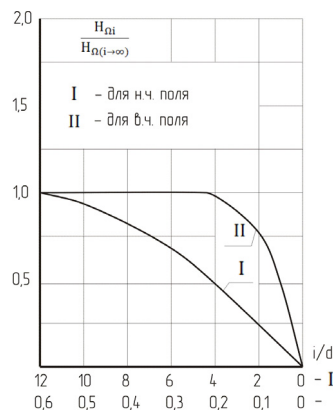


Рис. 7

Изменение коэффициента заполнения (относительно ВЧ-катушек) не оказывает, в пределах погрешности эксперимента, влияния на рассмотренные зависимости (рис. 6). Чтобы сравнить результаты при двухчастотном и одночастотном намагничивании, на рис. 7 показаны кривые распределения напряженности низкочастотного поля (I) и высокочастотного поля (II) на поверхности изделия в направлении к его краю.

Сопоставление кривых (рис. 4, а) и (рис. 6) показывает, что совместное намагничивание несколько улучшает результат по сравнению с низкочастотным полем, при этом значительно уступая высокочастотному. Оптимальным оказывается случай намагничивания в средних полях ($H_{m\Omega} = 1600 + 3200 \text{ А/м}$).

Величина оптимального поля зависит и от других параметров намагничивающих полей $\omega, H_{m\Omega}, \Omega$, которые могут повлиять на зависимость $U_{\text{вхр}} = f(H_{m\Omega})$. Исходя из закономерностей совместного намагничивания, можно сказать, что увеличение $H_{m\omega}$ или ω (или уменьшение Ω) приведет к увеличению оптимального поля $H_{m\Omega}$.

Исследования по выявлению дефектов двухчастотным методом показали, что неконтролируемыми остаются участки размером до 3–6 см, что является его существенным недостатком. Для уменьшения влияния края изделия можно использовать известные в практике контроля приемы. К ним можно отнести применение замкнутых вокруг датчика магнитопроводов либо торцевых короткозамкнутых медных экранов. Те и другие влияют на распределение поля внутри преобразователя и делают его равномерным.

4. Влияние базового расстояния $R\delta$ на выявляемость дефектов

Как известно, для целей дефектоскопии наибольшее применение находят преобразователи, реализующие принцип самосравнения. Последний предусматривает сравнение двух соседних участков одного образца с помощью двух идентичных измерительных катушек, расположенных на некотором расстоянии $R\delta$ друг от друга. Известны случаи, когда расстояние между такими катушками составляет 8–10 см, при контроле прутков диаметром всего 22 мм. В других работах авторы рекомендуют, наоборот, максимально сближать измерительные катушки между собой. А между тем правильный выбор расстояния $R\delta$ может значительно повысить разрешающую способность дефектоскопа в целом.

Чрезмерное увеличение $R\delta$ приводит к увеличению чувствительности не только к дефектам, но и к медленно изменяющимся по длине физическим свойствам образца. Уменьшение $R\delta$ может уменьшить чувствительность не только к мешающим параметрам, но и к дефектам. Л. М. Федотовым проведены исследования влияния базового расстояния на выявляемость дефектов применительно к токовихревым проходным преобразователям [7]. В результате этого получено оптимальное соотношение между $R\delta$ и диаметром измерительных катушек D_k ($\frac{R\delta}{D_k} = 0,2$).

Однако результаты, полученные в [7], нами не могут быть использованы, так как метод вихревых токов и двухчастотный метод по своей физике принципиально различны. Поэтому применительно к последнему нами были проведены исследования по определению оптимального расстояния $R\delta$. Для этого были изготовлены три датчика, имеющие разный диаметр катушек (коэффициенты заполнения соответственно 0,1; 0,14 и 0,3). Подвижные измерительные катушки позволяли устанавливать различную величину $R\delta$. Испытаниям подвергались ферромагнитные образцы с искусственными дефектами. Оценка выявляемости дефектов заключалась в определении отношений сигналов, вызываемых дефектами, к максимальному значению сигнала шума ($A_c/A_{\text{ш}}$).

Частота высокочастотного поля возбуждения $\frac{\omega}{2\pi} = 100 \text{ кГц}$, его величина $H_{\text{мш}} = 10 \text{ А/м}$. Полученные результаты представлены в виде графиков на рис. 8. Все кривые носят экстремальный характер, что говорит о существовании оптимальной величины $R\delta$. В области малых $R\delta$ зависимость более сильная. При больших $R\delta$ не только происходит некоторое уменьшение $A_c/A_{\text{ш}}$, но и ухудшается процесс расшифровки записанной диаграммы. Увеличение размеров дефектов (рис. 8, б) приводит к небольшому смещению максимума вправо. Этот же эффект наблюдается и при увеличении коэффициента заполнения (рис. 8, в).

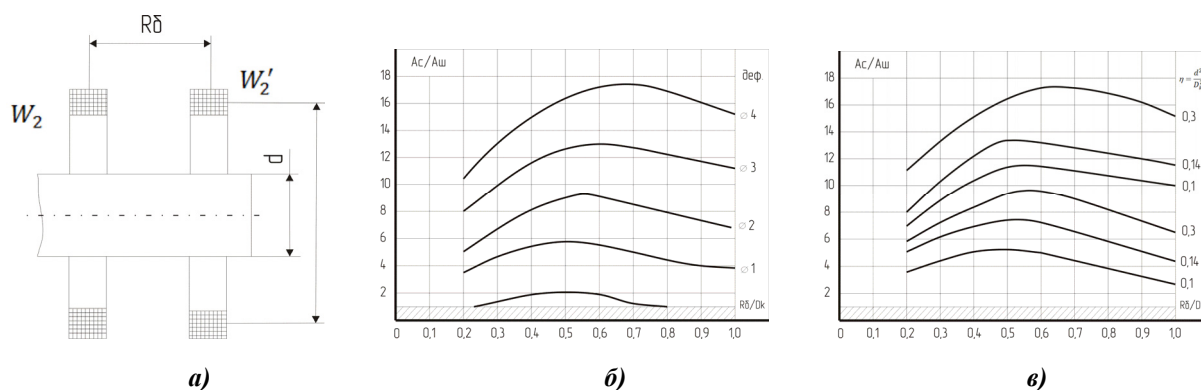


Рис. 8. К выбору оптимального базового расстояния $R\delta$ при контроле

Необходимо отметить, что общий характер полученных кривых более пологий по сравнению с результатами [7]. Это позволяет менее критично подходить к выбору $\frac{R\delta}{D_k}$. Таким образом, для двухчастотных дифференциальных датчиков самосравнения можно рекомендовать $\frac{R\delta}{D_k} = (0,4 \div 0,6)$. При контроле глубинных дефектов это отношение необходимо несколько увеличить.

Библиографический список

1. Rosado Luís S. Non-destructive testing based on Eddy currents : M. Sc. thesis / Luís S. Rosado ; Instituto Superior Técnico. – Lisbon, 2009. – P. 1–10.
2. Учанин В. Н. Вихретоковые мультидифференциальные преобразователи и их применение / В. Н. Учанин // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2006. – № 3. – С. 34–41.
3. Патент РФ № 137123. Вращающийся вихретоковый преобразователь.
4. Федотов А. Ю. Электромеханические преобразователи вихретокового типа для оценки геометрических параметров электропроводящих объектов : дис. ... канд. техн. наук / А. Ю. Федотов. – Самара, 2008. – 137 с.
5. Бесконтактное измерение удельной электрической проводимости цилиндрических изделий в поперечном переменном магнитном поле / А. А. Авраменко, В. П. Себко, В. И. Тюпа, В. А. Друнов // Метрология. – 1983. – № 10. – С. 48–54.
6. Гормаков А. Н. Расчет и моделирование магнитных полей, создаваемых системой «кольца Гельмгольца – соленоид» / А. Н. Гормаков, И. А. Ульянов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 40–45.
7. Федотов Л. М. Исследование и разработка электромагнитных дефектоскопов с проходными преобразователями применительно к условиям поточного производства : дис. ... канд. техн. наук / Л. М. Федотов. – М., 1969. – 167 с.



УДК 543.422.8

Б. И. Китов^{^1}

СПЕКТР РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ ПОСЛЕ РАССЕЯНИЯ НА ПОЛЯРИЗАТОРЕ

Аннотация. Рассчитан спектр смешанного излучения массивного анода рентгеновской трубки, рассеянного на однородной плоской мишени, с целью использования при рентгенофлуоресцентном анализе вещества.

Ключевые слова: рентгеноспектральный флуоресцентный анализ, спектральная плотность тормозного излучения, поляризатор, спектральная функция, интегральная интенсивность рассеяния излучения.

Об авторе:

^{^1} Д. т. н., профессор, ИрГУПС, Иркутск.

B. I. Kitov

SPECTRAL DISTRIBUTION OF X-RAY TUBE RADIATION SCATTERED ON POLARIZER

Abstract. The formula was derived to calculate the X-ray tube massive anode's mixed radiation scattered on the homogeneous flat target.

Keywords: X-ray fluorescence analysis, deceleration radiation spectral density, polarizer, spectral function, radiation scattering integral intensity.

Одной из перспективных новаций рентгеноспектрального флуоресцентного анализа является применение поляризованного излучения рентгеновской трубки [1]. Оно позволяет на два порядка увеличить контрастность аналитической линии и соответственно понизить предел обнаружения элементов. Физика эффекта заключается в том, что регистрация вторичного излучения происходит в перпендикулярном направлении к плоскости поляризации первичного излучения, где фон от рассеяния мал. Поляризатором служит плоская металлическая пластина из элементов с малыми атомными номерами. Рассеиватель-поляризатор не обязательно является плоским – для повышения светосилы спектрометра его делают и криволинейным, например в виде цилиндрического зеркала [2].

После рассеяния на поляризаторе из-за абсорбции излучения в теле поляризатора излучения спектральная функция искажается, и учесть это является задачей данной статьи.

Пусть под углом α к поверхности поляризатора направлен поток неполяризованного рентгеновского излучения, возбужденный в трубке с массивным анодом.

Рентгеновское излучение проникает вглубь поляризатора, диффузно рассеивается на электронах его атомов и распространяется по всем направлениям, в том числе и в пределах бесконечно малого телесного угла $d\Omega$. При угле рассеяния θ выход излучения из поляризатора происходит под углом $\theta - \alpha$. При малых углах θ отбирается в основном поляризованное излучение. При когерентном рассеянии длина волны каждого кванта рассеянного рентгеновского излучения λ_s сохраняется равной

первоначальной $\lambda_s = \lambda_{coh} = \lambda$, при некогерентном рассеянии длина волны $\lambda_s = \lambda_{incoh} > \lambda$ увеличивается в соответствии с законом Комптона.

В настоящее время при расчете спектральной плотности тормозного излучения (размерность: фотон/электрон/стерадиан/нм) применяется формула Крамерса [3], дополненная учетом поглощения излучения в аноде и в окне трубки и учетом обратного рассеяния электронов от анода [4–6]:

$$N(\lambda) = 1,085 \cdot 10^{-6} \cdot Z \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{f(\chi)}{L} \cdot \exp[-\mu_{Be}(\lambda) \rho_{Be} d_{Be}], \quad (1)$$

где Z – атомный номер анода рентгеновской трубки; d_{Be} , ρ_{Be} , $\mu_{Be}(\lambda)$ – соответственно толщина окна, плотность материала окна и массовый коэффициент ослабления материалом окна рентгеновской трубки излучения с длиной волны λ ; $L = \ln\left(\frac{1166}{J} \cdot \frac{E_0}{2}\right)$; $f(\chi)$ – поправка на поглощение излучения в аноде; R – фактор обратного рассеяния электронов; J – средний потенциал ионизации атомов анода (эВ); E_0 – начальная энергия электронов (кэВ).

Интенсивность характеристической линии f (размерность: фотон/электрон/стерадиан) была получена исходя из закона торможения электронов Бете и зависимости сечения ионизации атома от энергии электрона Томсона – Уидингтона и, согласно [6], равна:

$$N_f = \frac{0,0199 \cdot \omega_q n_q b_q}{Z} P_f(u \ln u - u + 1) \cdot f(\chi) \cdot R \frac{\exp[-\mu_{Be}(\lambda_f) \rho_{Be} d_{Be}]}{\ln\left(\frac{1166}{J} \bar{E}\right)}, \quad (2)$$

где b_q – константа, определяемая энергетическим состоянием возбужденного атома; n_q – количество электронов в q -м электронном слое атома анода; P_f – вероятность испускания линии f серии q характеристического излучения анода; $\bar{E}$ – средняя энергия электрона; $u = E/E_q$ – перенапряжение; ω_q – квантовый выход флуоресценции q -оболочки атома анода.

Интенсивность рассеяния на бесконечно толстом образце рентгеновского излучения с длиной волны λ описывается формулой:

$$N_{disp} = N_{prim} \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}}{\frac{\mu(\lambda)}{\sin \alpha} + \frac{\mu(\lambda_{disp})}{\sin(\theta - \alpha)}}. \quad (3)$$

Здесь $\mu(\lambda)$ и $\mu(\lambda_{disp})$ – соответственно массовые коэффициенты ослабления в веществе поляризатора первичного и рассеянного излучения. При когерентном рассеянии $\mu(\lambda) = \mu(\lambda_{disp})$. В формуле (3) в случае рассеяния характеристического излучения под N_{prim} можно понимать интенсивность N_f линии f анода, а в случае рассеяния тормозного излучения – интенсивность $N(\lambda) \cdot d\lambda$ участка непрерывного спектра шириной $d\lambda$. Дифференциальный массовый коэффициент рассеяния

$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma_{coh}}{d\Omega} + \frac{d\sigma_{incoh}}{d\Omega}$ представляет собой сумму его когерентной и некогерентной составляющих.

Выбор толщины поляризатора является предметом оптимизации, так как ее увеличение до некоторого предела повышает интенсивность рассеянного излучения, но, с другой стороны, из-за эффекта многократного рассеяния уменьшает степень поляризации. Для расчета интенсивности рассеянного рентгеновского излучения на поляризаторе толщиной D из материала с удельной плотностью ρ формула (3) дополняется экспоненциальным множителем:

$$N_{disp} = N_{prim} \frac{\frac{d\sigma}{d\Omega}}{\frac{\mu(\lambda)}{\sin \alpha} + \frac{\mu(\lambda_{disp})}{\sin(\theta - \alpha)}} \left(1 - \exp \left(- \frac{\mu(\lambda)\rho D}{\sin \alpha} - \frac{\mu(\lambda_{disp})\rho D}{\sin(\theta - \alpha)} \right) \right). \quad (4)$$

Применение формул (3) и (4) к нахождению спектральной функции рассеянного тормозного излучения заключается в сложении на едином волновом интервале двух независимых распределений когерентно и некогерентно рассеянного излучения.

Аппроксимация зависимости атомного дифференциального коэффициента рассеяния от угла рассеяния θ , от атомного номера Z и от длины волны падающего излучения λ приведена в статье [7]. Массовый дифференциальный коэффициент когерентного рассеяния может быть рассчитан по формуле:

$$\frac{d\sigma_{coh}}{d\Omega} = \frac{N}{A} \cdot \frac{d\sigma_e^T}{d\Omega} \cdot [Z \cdot (e^j + 0,12)]^2, \quad (5)$$

где $N = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро; A – атомный вес вещества поляризатора;

$$j = \frac{5,91}{\sqrt[3]{Z}} \cdot \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\lambda}. \quad (6)$$

Рассеяние на свободном электроном оценивается по формуле Томпсона:

$$\frac{d\sigma_e^T}{d\Omega} = r_o^2 \cdot \frac{1 + \cos^2 \theta}{2}. \quad (7)$$

Здесь $r_o = \frac{e^2}{m_0 c^2}$ – формула для расчета классического радиуса электрона, в

которой e – заряд электрона; m_0 – масса покоя электрона; c – скорость света в вакууме. С учетом этого $r_o^2 = 7,94 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$.

Массовый дифференциальный коэффициент некогерентного рассеяния, согласно [7], записывается:

$$\frac{d\sigma_{incoh}}{d\Omega} = \frac{N}{A} \cdot \frac{d\sigma_e^{N-K}}{d\Omega} \cdot Z \cdot (1 - e^{-5V}), \quad (8)$$

где

$$V = \frac{2,21}{\sqrt[3]{Z^2}} \cdot \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\lambda_{incoh}}. \quad (9)$$

Длина волны некогерентного излучения $\lambda_{incoh} = \frac{12,395}{\varepsilon_{incoh} \text{ (кВ)}}$ может быть найдена из формулы Комптона [8]:

$$\varepsilon_{incoh} = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{\varepsilon}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}, \quad (10)$$

где ε – энергия первичного фотона; ε_{incoh} – энергия некогерентно рассеянного фотона; $m_0 c^2 = 511$ кэВ – энергия покоящегося электрона.

Входящее в формулу (8) дифференциальное сечение Нишины – Клейна вычисляется по формуле из работы [8]:

$$\frac{d\sigma_e^{N-K}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{\varepsilon_{incoh}}{\varepsilon} \right)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{incoh}} + \frac{\varepsilon_{incoh}}{\varepsilon} - \sin^2 \theta \right). \quad (11)$$

Отличие рассчитанных по формулам (5)–(8) значений $\frac{d\sigma_{coh}}{d\Omega}$ и $\frac{d\sigma_{incoh}}{d\Omega}$ от табличных значений этих величин [9] составляет от 3 до 10 %.

Теоретическая оценка формы спектра рассеянного излучения была выполнена для алюминиевого поляризатора. Расчет сделан для рентгеновской трубки с молибденовым анодом, имеющей бериллиевое окно толщиной 0,05 см, для напряжения 40 кВ, при угле рассеяния $\theta = 20^\circ$ и при угле падения $\alpha = 10^\circ$.

На рис. 1 показаны результаты расчета спектральных функций. Видно, что толщина поляризатора сказывается на форме спектра рассеянного тормозного излучения только в сравнительно узком диапазоне D от 0 до 0,1 см (графики 2–4), за пределами которого спектр можно считать не зависящим от D .

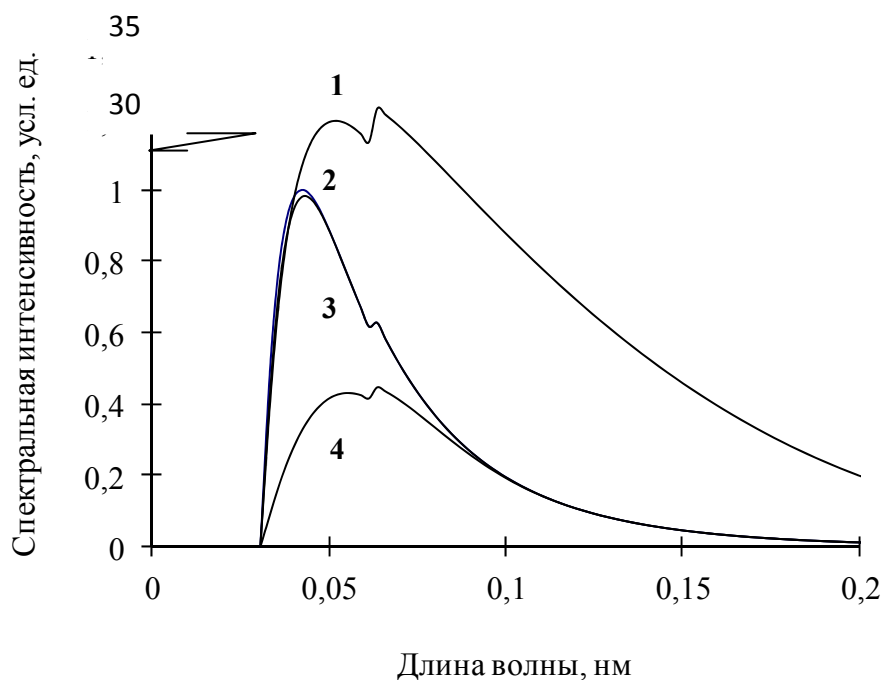


Рис. 1. Форма спектральной функции тормозного излучения до рассеяния (1) и после рассеяния на поляризаторе толщиной 1 см (2), 0,1 см (3) и 0,01 см (4)

Наиболее значительное искажение спектра рассеянного излучения по сравнению со спектром первичного тормозного излучения (график 1) наблюдается для поляризатора самой малой толщины (график 4). Масштаб для графика 1 на рис. 1 выбран в 25 раз меньшим, чем масштаб, в котором изображены графики 2–4.

В искажении формы спектральной функции по сравнению с первоначальной участвуют два процесса: усиление некогерентного рассеяния с ростом θ и λ и ослабление с ростом этих параметров интенсивности когерентного рассеяния. На рис. 2 показана спектральная функция рассеянного на поляризаторе тормозного излучения, возбужденного при разности потенциалов на электродах трубки 40 кВ, и при углах рассеяния θ , равных 2° , 10° и 20° . Для наглядности максимальные значения всех трех спектральных функций были заданы одинаковыми.

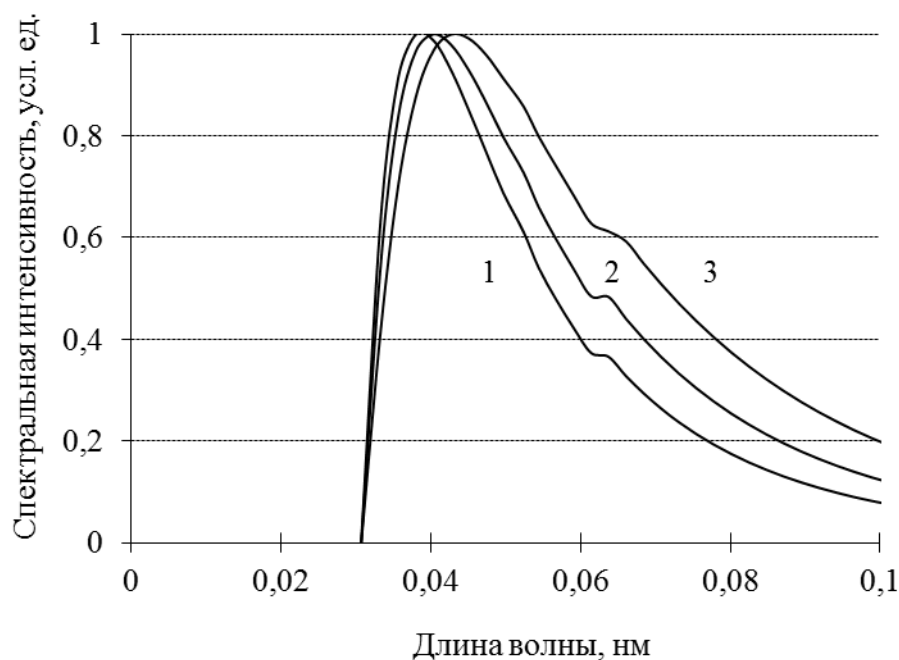


Рис. 2. Спектральная функция тормозного излучения при углах рассеяния $\theta = 2^\circ$ (1), 10° (2) и 20° (3)

Максимум тормозного излучения смещается в длинноволновую сторону. Этот результат, хорошо известный в физике рентгеновских лучей, косвенно подтверждает правильность сконструированной выше математической модели для расчета N_λ .

Пространственное распределение рассеянного излучения, представленное в виде зависимости интегральной интенсивности тормозного излучения от угла рассеяния θ , приведено на рис. 3. Расчет выполнен для поляризатора с $D = 0,01, 0,1$ и 1 см. При сопоставлении графиков наблюдается небольшое смещение положения максимума спектральной функции. Наибольшая интенсивность возникает при углах $\theta = 12\text{--}15^\circ$. Характерным является резкий спад интенсивности при уменьшении угла рассеяния θ в области его малых значений. Из того факта, что график 2 незначительно отличается от графика 3, следует, что насыщение рассеивающего слоя поляризатора наступает уже при $D = 0,1$ мм. Использование поляризатора большей толщины почти не увеличит интенсивность рассеяния, но может ухудшить степень поляризации из-за многократного рассеяния в глубине вещества.

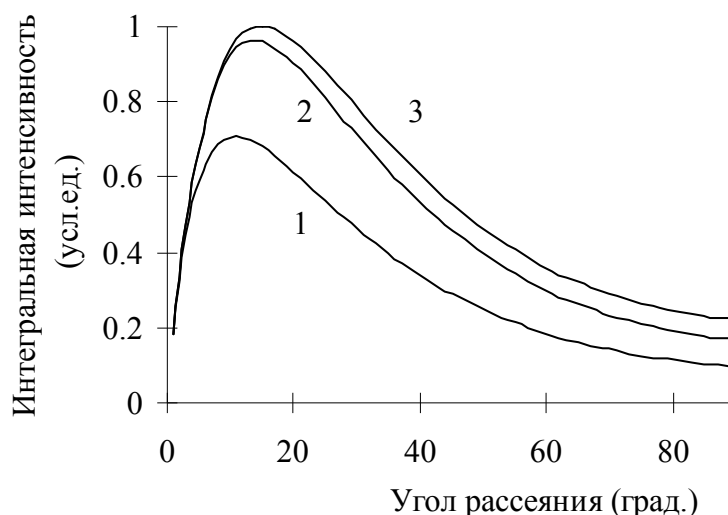


Рис. 3. Зависимость интегральной интенсивности тормозного излучения от угла рассеяния при $D = 0,01$ см (1), $0,1$ см (2), 1 см (3). Напряжение на трубке 40 кВ

Таким образом, при вычислении спектральной функции рассеянного излучения используются 4 инструментальных параметра: угол рассеяния θ , угол падения первичного излучения на поляризатор α , удельная плотность ρ и толщина последнего D и фундаментальные параметры: дифференциальные коэффициенты рассеяния когерентного и некогерентного рассеяния.

Выводы

Для алюминиевого поляризатора наибольшая интегральная интенсивность рассеяния излучения наступает при угле рассеяния $\theta = 12-15^\circ$. Его, по-видимому, следует признать оптимальным, так как дальнейшее уменьшение угла рассеяния с целью повышения степени поляризации приведет к резкому падению интегральной интенсивности первичного излучения. Следует также отметить малую оптимальную толщину поляризатора. Его поверхностный слой становится насыщенным уже при $D = 0,1$ см.

Библиографический список

1. Ryon R. W. Improved X-ray fluorescence capabilities by excitation with high intensity polarized X-rays / R. W. Ryon, J. D. Zart // *Advances in X-Ray Analysis*. – 1978. – Vol. 22. – P. 453–460.
2. Жалсараев Б. Ж. Поляризационный спектрометр с новой рентгенооптической схемой / Б. Ж. Жалсараев // III Всероссийская и IV Сибирская конференция по рентгеноспектральному анализу : тез. докл. – Иркутск, 1998. – С. 22.
3. Kramers H. A. On the theory of X-ray absorbtion and of the continuous X-ray spectrum / H. A. Kramers // *Phyl. Mag.* – 1923. – Vol. 46. – No. 275. – P. 836–871.
4. Pella P. A. An analytical algorithm for calculation of spectral distribution of X-ray tubes for quantitative X-ray fluorescence analysis / P. A. Pella, L. Feng, J. A. Small // *X-Ray Spectrometry*. – 1985. – Vol. 14. – No. 3. – P. 125–135.
5. Бахтиаров А. В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии / А. В. Бахтиаров. – Л. : Недра, 1985. – 144 с.

6. Финкельштейн А. П. Расчет спектрального распределения первичного излучения при рентгенофлуоресцентном анализе / А. П. Финкельштейн, Т. Н. Гуничева, В. П. Афонин [и др.] // Заводская лаборатория. – 1981. – Т. 47. – № 11. – С. 28–31.

7. Бахтиаров А. В. Формулы для приближенного вычисления дифференциальных сечений рассеяния рентгеновского излучения малых энергий / А. В. Бахтиаров, Г. А. Пшеничный // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. – Л. : Машиностроение, 1973. – Вып. 12. – С. 68–72.

8. Жуковский А. Н. Высокочувствительный рентгенофлуоресцентный анализ с полупроводниковыми детекторами / А. Н. Жуковский, Г. А. Пшеничный, А. В. Мейер. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 161 с.

9. Таблицы и формулы рентгеноспектрального анализа: дифференциальные коэффициенты рассеяния для рентгенорадиометрического анализа : метод. указ. / под ред. Н. И. Комяка ; сост. О. С. Маренков. – Л. : Машиностроение, 1984. – 137 с.



ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ



Математика
Физика
Астрономия
Фармацевтические науки
Науки о Земле



УДК 615.322

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} Студентка 5 курса фармацевтического факультета СГМУ, Архангельск, darja.nek@yandex.ru.

^{^2} Студент 5 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 the resource potential of *Maianthemum bifolium* grown in the Shenkursk area of the Arkhangelsk region was studied, the number indicators of air-dried plant material are set.

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, опухолях 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 возможного объема 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 $\pm 5\%$ [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].

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.



Рис. 1. Карта Шенкурского района Архангельской области

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	25 191,1	3 468,1	578,0
к оз. Юмгозеро	252,30	355,8±9,2	94 410,7	18 446,8	3074,5
к оз. Квалозеро	164,50	76,1±2,1	13 209,4	2 563,0	427,2
к оз. Большое Искозеро	365,20	120,3±4,5	47 220,4	8 808,2	1 468,0
к оз. Малое Водлесское	250,80	101,9±8,2	29 669,6	4 646,8	774,5
к оз. Большое Черное	160,40	57,8±2,1	9 944,8	1 863,1	310,5
к оз. Долгое	364,52	87,1±3,1	34 009,7	6 390,4	1 065,1
к оз. Ворбас	250,60	279,3±5,2	72 598,8	14 602,6	2 433,8
к оз. Островское	164,30	65,7±7,4	13 226,2	1 812,2	302,0
к реке Ледь (правый берег)	130,20	301,4±6,4	40 908,8	8 142,7	1 357,1
к реке Ледь (левый берег)	90,86	320,1±7,8	30 501,7	5 995,4	999,2

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
к реке Вадлеша (правый берег)	100,5	231,2±3,4	23 919,0	4 887,1	814,5
к реке Вадлеша (левый берег)	53,70	367,3±5,1	20 271,8	4 155,5	692,6
к реке Ворбас (правый берег)	98,65	298,5±6,2	30 670,3	6 116,1	1 019,3
к реке Ворбас (левый берег)	58,90	68,2±9,6	5 147,9	625,4	104,2
к болоту Симонское	102,65	134,3±6,2	15 058,8	2 711,6	451,9
к болоту Лум	100,35	198,2±7,1	21 314,3	4 001,2	666,9
к болоту Рябиновое	97,85	145,2±6,8	15 538,6	2 790,5	465,1
	3 170,84		542 811,9	102 026,7	17 004,4

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 пустого бюкса, г	Масса бюкса с сырьем до высушивания, г	Масса бюкса с сырьем 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 сырьем до прокаливании, г	Масса тигля с сырьем после прокаливании, 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 сырьем до прокаливания, г	Масса тигля с сырьем после прокаливания, г	Зола, нерастворимая в хлористоводородной кислоте, %	Метрологические характеристики
28,5801	29,5028	28,5813	0,130	$\bar{X} = 0,12$ $S_x = 0,002$ $\Delta x = 0,006$ $\varepsilon = 5,28\%$
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%-м 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. Лекарственные растения Севера / Л. Е. Астрологова, П. А. Феклисов. – Архангельск : Изд-во АГТУ, 2002. – 156 с.
2. Майник двулистный (ландыш двулистный) – *Maianthemum bifolium* L. Семейство лилейные – Liliaceae. – URL: <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. – No. 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.] // *Chin. J. of Nat. Medicines*. – 2015. – No. 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 // *Раст. ресурсы*. – 2012. – № 2. – С. 207–211.
7. Струсовская О. Г. Ресурсоведческие и фитохимические исследования перспективных видов сырья дикорастущих растений островов Соловецкого архипелага : дис. ... д-ра фарм. наук / О. Г. Струсовская ; Волгоградский гос. мед. ун-т. – Пятигорск, 2014. – 412 с.
8. ОФС.1.5.3.0007.15. Определение влажности лекарственного растительного сырья и лекарственных растительных препаратов.
9. ОФС.1.2.2.2.0013.15. Общая зола.
10. ОФС.1.5.3.0005.15. Зола, нерастворимая в хлористоводородной кислоте.



НАУКИ О ЗЕМЛЕ



Математика
Физика
Астрономия
Фармацевтические науки
Науки о Земле



УДК 551.24.01

С. А. Борняков^{^1}, И. А. Пантелеев^{^2}, Д. В. Салко^{^3}, А. А. Тарасова^{^4}

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВОЛНОВОГО ХАРАКТЕРА РЕАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПАССИВНОМ МЕХАНИЗМЕ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТОГЕНЕЗА*

Аннотация. Выполнено физическое моделирование, направленное на выяснение механизма передачи деформаций со стороны Индостанской коллизии и Западно-Тихоокеанской субдукции к БРЗ. Полученные результаты показали, что деформационный процесс в модели обусловлен волновым механизмом, что подтверждает физическую возможность участия деформационных волн в реализации пассивного механизма байкальского рифтогенеза.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая зона, механизм формирования, физическое моделирование, деформационные волны.

Об авторах:

^{^1} К. г.-м. н., с. н. с., Институт земной коры СО РАН, доцент, ИГУ, Иркутск, bornyak@crust.irk.ru.

^{^2} К. ф.-м. н., с. н. с., Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, pia@icmm.ru.

^{^3} М. н. с., Институт земной коры СО РАН, Иркутск, denis@salko.net.

^{^4} М. н. с., Институт земной коры СО РАН, старший преподаватель, ИрГУПС, Иркутск, tarasova@crust.irk.ru.

S. A. Bornyakov, I. A. Panteleev, D. V. Salko, A. A. Tarasova

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF WAVE NATURE OF IMPLEMENTATION OF DEFORMATIONS AT A PASSIVE MECHANISM OF THE BAIKAL RIFTING

Abstract. Physical modeling aimed to verify the mechanism of transmission of strains from the Indostan collision and the West-Pacific subduction to Baikal rift zone is performed. The results showed that the deformation process in the model is driven by wave mechanism, which confirms the physical possibility of participation of deformation waves in implementing passive mechanism of the Baikal rifting.

Keywords: Baikal rift zone, mechanism of formation, physical modeling, deformation waves.

Введение

Одной из основных проблем рифтогенеза, обозначенных в свое время М. Боттом [1], является проблема механизма формирования континентальных рифтовых зон. С развитием концепции тектоники плит количество предлагаемых вариантов интерпретации их генетической природы существенно сократилось и свелось к двум основным механизмам – активному и пассивному [2]. Первый реализуется при воздействии местного подлитосферного энергетического источника, в виде поднимающейся конвектирующей аномальной мантии, второй обусловлен действием уда-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (16-55-44017-Монг_a; 16-35-00349-Мол-а).

ленных энергетических источников, находящихся за пределами места развития рифтогенного процесса. Применительно к интерпретации механизма формирования БРЗ долгое время существовали две взаимоисключающие точки зрения. Сторонники первой из них принимали за источник рифтогенного растяжения подъем к подошве литосферы и последующее направленное горизонтальное перемещение аномальной мантии в ЮВ направлении [3], тогда как сторонники второй точки зрения связывали природу этого растяжения с Индостанской коллизией [4]. По мере накопления комплекса новых геолого-геофизических и сейсмологических данных острота противостояния сторонников этих двух точек зрения ослабевала и постепенно выходила на путь компромисса, допускающего их совместное действие [1, 5–8]. В девяностых – двухтысячных годах представления об обсуждаемых механизмах байкальского рифтогенеза претерпели изменения.

Сопоставительные анализы сейсмичности и вулканизма в пределах Центральной, Восточной и Юго-Восточной Азии показали существенное влияние на них Западно-Тихоокеанской субдукции [11–13 и др.], что послужило поводом рассматривать ее в качестве еще одного удаленного энергетического источника для байкальского рифтогенеза наряду с Индостанской коллизией.

Так, более поздние результаты сейсмотомографии показали, что ранее выделенная под БРЗ аномальная мантия [9] не является единой, а имеет дифференцированное строение и состоит не из одного крупномасштабного подлитосферного мантийного потока, а из трех локальных потоков [10]. Это обстоятельство указывает на существенно меньший вклад активного механизма в рифтогенный процесс, чем считалось ранее.

Для получения дополнительных аргументов при обосновании механизма формирования БРЗ неоднократно привлекалось физическое моделирование. В большинстве выполненных экспериментов тестировался либо активный, либо пассивный механизм рифтогенеза [14–17], и лишь в одном из них использован комплексный подход и экспериментально проверялись разные варианты их раздельного или совместного действия [18]. Это позволило показать, что БРЗ имеет гетерогенную природу и геодинамика определяется локальными пространственно-разобщенными местными подлитосферными мантийными потоками, Индостанской коллизией и Западно-Тихоокеанской субдукцией. Моделирование показало, что каждый из этих энергетических источников вносит свой вклад в процесс ее формирования. При их кооперативном действии в определенном сочетании, благоприятном для рифтогенного процесса, юго-западный и северо-восточный фланги БРЗ развиваются как структуры трансенсии, а ее центральная часть, за исключением дистальных окончаний, прилегающих к флангам, развивается как пассивный рифт [18].

Принципиальная возможность механического влияния Индостанской коллизии и Западно-Тихоокеанской субдукции на геодинамику БРЗ подтверждается сейсмологическими данными [11] и результатами математического [12] и физического [15, 17–20] моделирования. Однако пока остается открытым принципиальный вопрос, касающийся механизма этого влияния, то есть механизма передачи неупругих деформаций от Индостанской и Тихоокеанской плит через Евразийскую плиту на расстояния в первые тысячи километров. Данные GPS-геодезии показывают постепенное снижение скоростей горизонтальных перемещений от Индостанской плиты к северо-востоку и от Тихоокеанской плиты к северо-западу, что можно было бы объяснить диффузионным механизмом передачи деформаций от них в сторону БРЗ. Однако этот механизм вряд ли может самостоятельно обеспечить их передачу на большие расстояния. Весьма вероятно, что в этом деформационном процессе наряду с диффузионной участвует волновая составляющая [21 и др.]. Косвенным подтверждением его реализации с участием медленных деформационных волн могут слу-

жить результаты анализа пространственно-временной миграции сейсмической активности в пределах Евразийской плиты [22, 23]. Для проверки этого явления авторами настоящей статьи выполнено физическое моделирование, результаты которого представлены ниже. Цель моделирования заключалась в проверке физической возможности передачи деформаций от Индостанской и Тихоокеанской плит в сторону БРЗ посредством медленных деформационных волн.

1. Оборудование, граничные условия эксперимента и метод обработки фактического материала

Для проведения экспериментов был изготовлен прямоугольный короб из оргстекла, шириной 0,6 м и длиной 1,0 м с высотой боковых бортов 0,02 м (рис. 1). Основание короба обильно смазывалось вазелиновым маслом перед закладкой модели.

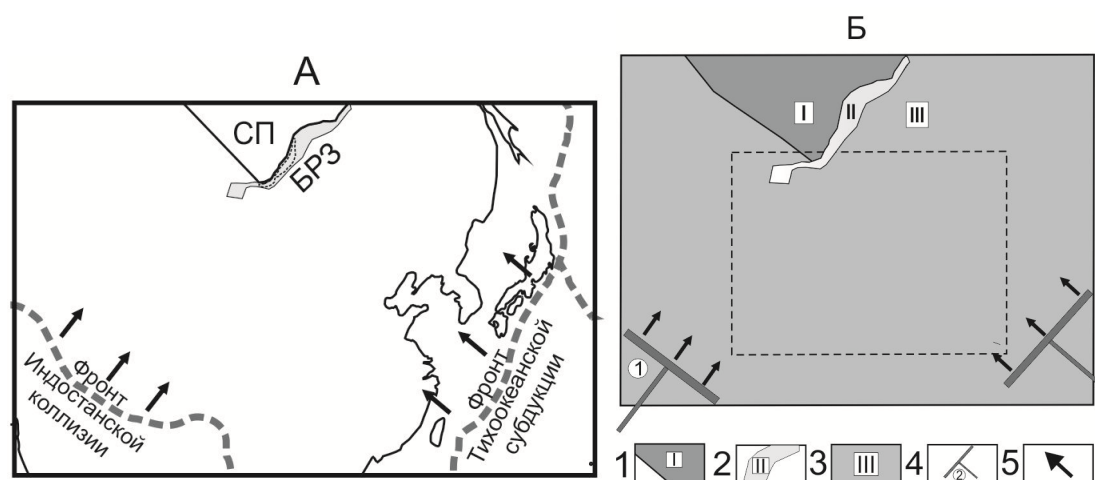


Рис. 1. Упрощенная геодинамическая схема объекта моделирования (А) и ее модельный аналог (Б): СП – Сибирская платформа; БРЗ – Байкальская рифтовая зона; I – блок, имитирующий южный выступ Сибирской платформы; II – блок, имитирующий Байкальскую рифтовую зону; III – блок, имитирующий часть Евразийской плиты, подверженной деформационному воздействию со стороны Индостанской и Тихоокеанской плит; 4 – подвижные штампы, имитирующие движение Индостанской (1) и Тихоокеанской (2) плит; 5 – направление движения штампов

В качестве модельного материала использована водная паста монтмориллонитовой глины, обычно используемая в тектонофизическом моделировании. Выбор граничных условий эксперимента осуществлялся в соответствии с критерием подобия:

$$\eta / \rho g L T = \text{const}, \quad (1)$$

где η – вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – линейные размеры, м; T – время, с [24, 25]. Этот критерий позволяет вычислить масштабные коэффициенты для каждого из использованных в нем физических параметров. Используются масштабные коэффициенты подобия вязкости $C_\eta \sim 10^{18}$, плотности $C_\rho \sim 0,5$, линейных размеров $C_L \sim 5 \cdot 10^7$ и времени $C_t \sim 5 \cdot 10^{11}$. При таких значениях коэффициентов подобия 1 мм в модели соответствует 5 км в ее природном аналоге, а 1 минута эксперимента эквивалентна 1 млн лет природного процесса. Толщина модели была постоянная по всей площади и составляла 0,02 м. Вязкость модельного материала блоков I, II и III составляла 10^5 Па·с, 10^3 Па·с и 10^4 Па·с исходя из усредненных значений вязкости литосферы их природных аналогов 10^{23} Па·с, 10^{21} Па·с и 10^{22} Па·с

соответственно. Скорость горизонтального смещения штампов составляла 10 мм/мин для первого и 8 мм/мин для второго, что в пересчете через коэффициенты подобия C_l и C_t эквивалентно примерным оценкам скоростей горизонтальных движений 50 мм/год и 40 мм/год для Индостанской плиты и для Тихоокеанской плиты [26].

Развивающийся в модели процесс формирования сдвиговой зоны фотографировался цифровой фотокамерой Basler acA2000-50gm с частотой 1 fps (1 кадр в секунду). Для получения высококонтрастного изображения свободной поверхности модели на ее поверхность насыпался мелкий песок. Для обработки полученных с модели фотоматериалов был использован метод корреляции цифровых изображений, основанный на анализе последовательности оптических изображений деформируемой поверхности материала [27] (на базе программного обеспечения Strain Master компании La Vision).

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты обработки фотографий поверхности модели, полученных в ходе эксперимента. Для демонстрации показаны четыре расчетные ситуации, соответствующие произвольно выбранным временным срезам T_1 , T_2 , T_3 и T_4 . На них хорошо видно, что деформационный процесс в модели реализуется в виде распространяющихся по ней двух групп локализованных фронтов деформации, порождаемых подвижными штампами 1 и 2 (рис. 1, 2).

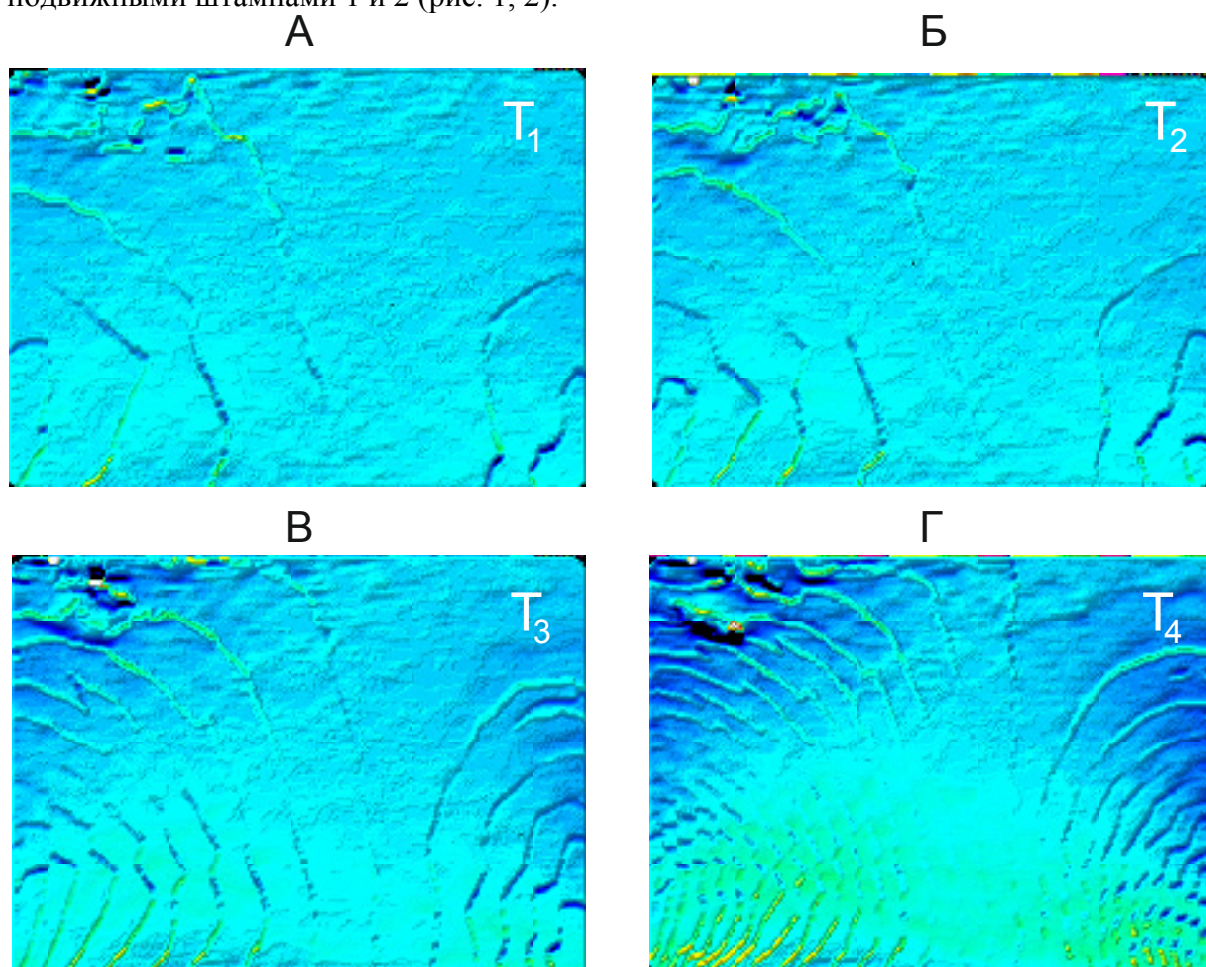


Рис. 2. Динамика пространственной миграции в модели локализованных фронтов деформации, инициированных штампами 1 и 2 в разное время от начала эксперимента T_1 , T_2 , T_3 и T_4

На начальной стадии моделируемого процесса деформационные фронты достаточно редки и отличаются высокой скоростью пространственной миграции (рис. 2, А). По мере развития деформационного процесса их плотность возрастает на фоне снижения скорости миграции (рис. 2, Б, В, Г).

Сопоставление волновых картин для времени T_1 показывает, что деформационные волны, инициированные первым штампом, имитирующим движение Индостанской плиты, появляются по времени раньше, чем деформационные волны от второго штампа, и в ходе дальнейшей эволюции волновой картины имеют доминирующую роль по площадному распространению и интенсивности (рис. 2). Каждая отдельная деформационная волна этой группы, перемещаясь по модели и достигая клиновидного выступа блока I, имитирующего блок Сибирской платформы и имеющего повышенную вязкость, замедляет на нем скорость движения (рис. 3). В данном случае выступ выступает для волн в роли жесткого упора, препятствующего их распространению и способствующего фрагментации левой части дугообразных волновых фронтов и их формоизменению, что хорошо прослеживается в левом верхнем углу расчетной площади (рис. 3, врезка А). Центральные части волновых фронтов продолжают движение сначала вдоль длинной оси блока II, а затем меняют вектор этого движения на близкий к горизонтальному по отношению к расчетной площади (рис. 3). В первом случае они способствуют реализации сдвиговых смещений на границе между блоком I и II, во втором случае они стимулируют появление растягивающих усилий в средней части блока II. Правые части волновых фронтов за счет их субвертикального положения по отношению к расчетной площади перемещаются слева направо навстречу волновым фронтам второй группы.

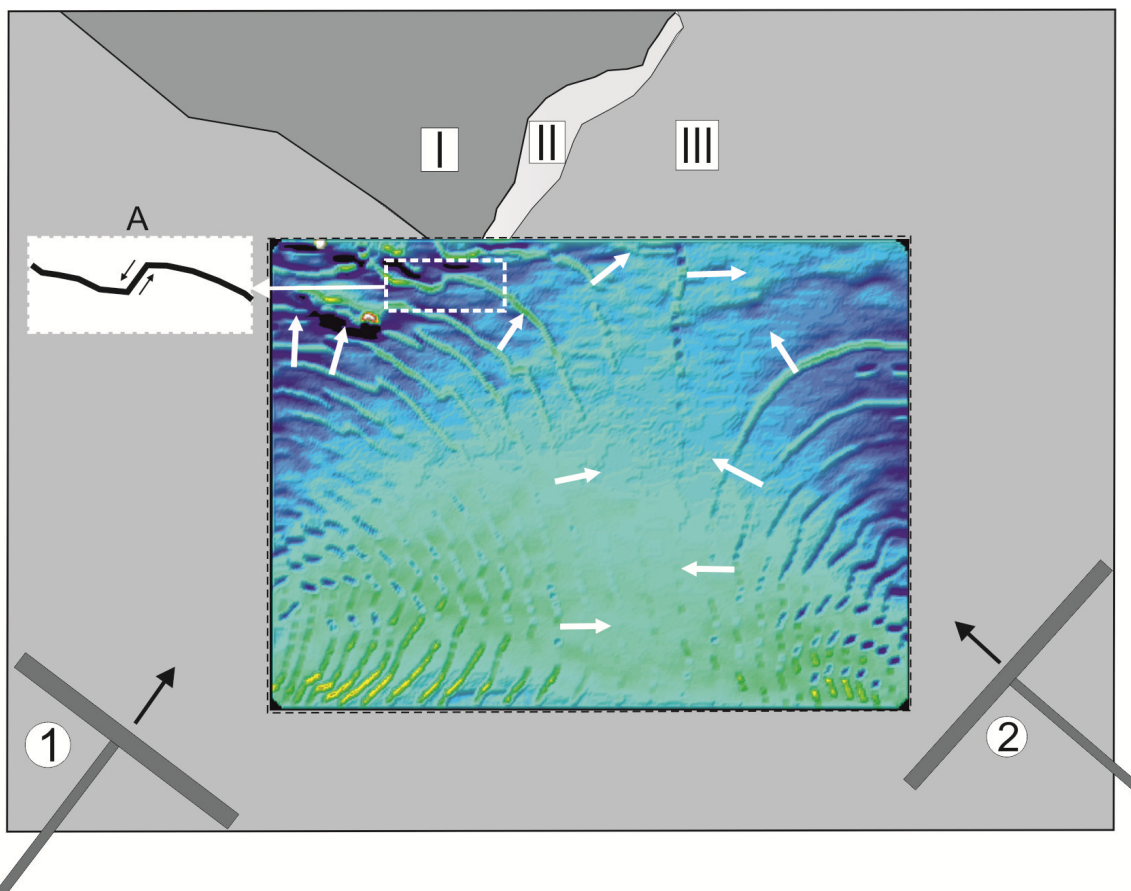


Рис. 3. Искажение волновой картины при взаимодействии локализованных фронтов деформаций с выступом блока I (направления их пространственной миграции показаны белыми стрелками) в модели. Условные обозначения показаны на рис. 1

Полученная картина пространственной миграции локализованных фронтов деформации от штампа I хорошо согласуется со схемой реконструкции медленных деформационных волн по сейсмологическим данным [22].

Заключение

В развитие сделанного ранее на основе результатов физического и математического моделирования вывода о гетерогенной геодинамической природе БРЗ [19, 20] выполнено дополнительное экспериментальное исследование. В проведенной новой серии экспериментов акцент сделан на выяснение механизма передачи деформаций со стороны Индостанской коллизии и Западно-Тихоокеанской субдукции к БРЗ. Обработка фотоматериалов экспериментов методом корреляции цифровых изображений позволила получить результаты, показывающие, что в развивающемся в модели деформационном процессе наряду с диффузионным механизмом принимает участие волновой механизм. Локализованные фронты деформаций периодически зарождаются у штампов, имитирующих движения Индостанской и Тихоокеанской плит, и свободно проходят от них через всю модель до блоков, имитирующих БРЗ и Сибирскую платформу. Таким образом, экспериментально подтверждена физическая возможность участия деформационных волн в реализации пассивного механизма байкальского рифтогенеза.

Библиографический список

1. Ботт М. Геодинамические процессы в континентальных рифтовых системах в приложении к Байкальскому рифту / М. Ботт // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей / под ред. Н. А. Логачева. – Новосибирск : Наука, 1990. – С. 317–323.
2. Sengor A. M. C. Relative timing of rifting and volcanism on Earth and its tectonic implications / A. M. C. Sengor, D. D. Richards // Geophys. Res. Lett. – 1978. – Vol. 5. – P. 419–421.
3. Zorin Yu. A. Mechanism of rifting and some features of the deep-seated structure of the Baikal rift zone / Yu. A. Zorin, V. A. Rogozhina // Tectonophysics. – 1978. – Vol. 45. – P. 23–30.
4. Molnar P. Cenozoic tectonic of Asia: effect of continental collision / P. Molnar, P. Tapponier // Science. – 1975. – Vol. 189. – P. 419–426.
5. Логачев Н. А. Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны / Н. А. Логачев // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 1–2. – С. 163–170.
6. Милановский Е. Е. Рифтогенез в истории Земли: рифтогенез в подвижных поясах / Е. Е. Милановский. – М. : Недра, 1987. – 297 с.
7. Ружич В. В. Сеймотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны / В. В. Ружич. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1997. – 144 с.
8. Хаин В. Е. Происхождение Центрально-Азиатского складчатого пояса / В. Е. Хаин // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей / под ред. Н. А. Логачева. – Новосибирск : Наука, 1990. – С. 5–8.
9. Рогожина В. А. Область аномальной мантии под Байкальским рифтом / В. А. Рогожина, В. М. Кожевников. – Новосибирск : Наука, 1979. – 104 с.
10. Крылов С. В. Недра Байкала / С. В. Крылов, М. М. Мандельбаум, Б. М. Мишенькин [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1981. – 105 с.
11. Дядьков П. Г. Возможное влияние землетрясений в Северном Тибете (2001 г.) и близ о. Хоккайдо (2003 г.) на процесс подготовки Алтайского землетрясения 2003 года / П. Г. Дядьков, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, А. В. Михеева, Ю. М. Кузнецова // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – № 1. – С. 67–72.
12. Nazarova L. A. Mathematical modeling of kinematics of Central Asian plates / L. A. Nazarova, L. A. Nazarov, P. G. Dyad'kov // Journal of Mining Science. – 2002. – Vol. 38. – No. 5. – P. 411–417.
13. Рассказов С. В. Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя (Южная Сибирь – Южная и Восточная Азия) / С. В. Рассказов, Н. А. Логачев, С. С. Брандт, С. Б. Брандт, А. В. Иванов. – Новосибирск : Наука, 2000. – 288 с.
14. Лучицкий И. В. Эксперименты по моделированию сводовых поднятий Байкальского типа / И. В. Лучицкий, П. М. Бондаренко // Геотектоника. – 1967. – № 2. – С. 3–20.

15. Chemenda A. Three-dimensional laboratory modelling of rifting: application to the Baikal Rift, Russia / A. Chemenda, J. De'verche, E. Calais // *Tectonophysics*. – 2002. – Vol. 356. – P. 253–273.
16. Corti G. Controls of lithospheric structure and plate kinematics on rift architecture and evolution: An experimental modeling of the Baikal rift / G. Corti, E. Calignano, C. Petit, F. Sani // *Tectonics*. – 2011. – Vol. 30. – No. 3. – P. 1–16.
17. Tapponnier P. Propagating extensional tectonics in Asia: New insight from simple experiments with plasticine / P. Tapponnier, G. Peltzer, A. I. Le Dain, R. Armijio, P. Cobbold // *Geology*. – 1982. – Vol. 10. – P. 611–616.
18. Борняков С. А. Экспериментальное исследование кайнозойской геодинамики Саяно-Байкальской ветви Центрально-Азиатского подвижного пояса / С. А. Борняков, А. Н. Адамович, А. В. Черемных // *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Вып. 1. – Иркутск : Институт географии СО РАН, 2003. – С. 31–33.
19. Логачев Н. А. О механизме формирования Байкальской рифтовой зоны по результатам физического моделирования / Н. А. Логачев, С. А. Борняков, С. И. Шерман // *ДАН*. – 2000. – Т. 373. – № 3. – С. 388–390.
20. Борняков С. А. О механизме формирования юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны по результатам физического моделирования / С. А. Борняков // *ДАН*. – 2004. – Т. 399. – № 2. – С. 221–223.
21. Быков В. Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели / В. Г. Быков // *Геология и геофизика*. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 1176–1190.
22. Wang S. Plastic-Flow waves ("Slow waves") and seismic activity in Central-Eastern Asia / S. Wang, Z. Zang // *Earthquake research in China*. – 2005. – Vol. 1. – P. 74–85.
23. Ружич В. В. Оценка геодинамического влияния зон коллизии и субдукции на сейсмотектонический режим Байкальского рифта / В. В. Ружич, Г. Г. Кочарян, Е. А. Левина // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2016. – Т. 7. – № 3. – С. 383–406.
24. Гзовский М. В. Основы тектонофизики / М. В. Гзовский. – М. : Наука, 1975. – 536 с.
25. Шерман С. И. Физический эксперимент в тектонике и теории подобия / С. И. Шерман // *Геология и геофизика*. – 1984. – № 3. – С. 8–18.
26. Vergnolle M. Dynamics of continental deformation in Asia / M. Vergnolle, E. Calais, L. Dong // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. – No. B11403. – P. 1–22.
27. Sutton M. A. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications / M. A. Sutton, J. J. Ortu, H. W. Schreier. – Springer, 2009. – 316 p.



УДК 550.837

*Ив. М. Варенцов^{^1}, П. В. Иванов^{^1}, С. Ковачикова^{^2}, И. Н. Лозовский^{^1},
рабочая группа KIROVOGRAD*

МАССИВ МТ/МВ-ЗОНДИРОВАНИЙ KIROVOGRAD: КВАЗИ-3D-ИНВЕРСИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ МВ-ОТКЛИКОВ*

Аннотация. Анализируются горизонтальные магнитовариационные (МВ) отклики на западном склоне Воронежского массива (ВМ) и прилегающих территориях. Демонстрируется их приоритетное значение при выделении коровых проводящих структур. С помощью многоплочной квази-3D-инверсии полного тензора горизонтальных МВ-данных определяются положение и суммарная продольная проводимость этих аномалий. Устанавливается их сложное сочленение к ЮВ от Брянска.

Ключевые слова: Воронежский массив, коровые аномалии электропроводности, синхронные зондирования KIROVOGRAD, горизонтальные МВ-отклики, многоплочная модель, квази-3D обратные задачи.

* Исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты 13-05-12094_офим и 13-05-91330_ННИО).

Об авторах:

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

^{^2} Геофизический институт Чешской АН, Прага.

*Iv. M. Varentsov, P. V. Ivanov, S. Kovachikova, I. N. Lozovskiy,
Working Group KIROVOGRAD*

KIROVOGRAD MT/MV SOUNDING ARRAY: QUASI-3D INVERSION OF HORIZONTAL MV RESPONSES

Abstract. Horizontal magnetovariational (MV) responses are analyzed at the western slope of the Voronezh Massif (VM) and adjacent territories. The importance of these data in the tracing of crustal conducting structures is demonstrated. The location and integral conductance of such anomalies are estimated applying the multisheet quasi-3D inversion technique to full-tensor MV data. The complicated junction of three crustal anomalies is outlined SE from Bryansk.

Keywords: Voronezh Massif, crustal conductivity anomalies, KIROVOGRAD simultaneous soundings, horizontal MV responses, multisheet models, quasi-3D inverse problems.

С 2006 г. в рамках международного проекта KIROVOGRAD с участием ученых России, Украины, Белоруссии, Польши и Чехии на ЮВ России и севере Украины развертывается площадной эксперимент синхронного магнитотеллурического (МТ) зондирования для изучения геоэлектрической структуры литосферы – в т. ч. прослеживания аномалий электропроводности, ассоциированных с древними платформенными швами и областями современной активизации [1–5]. Эти исследования реализуют передовые технологии синхронных зондирований, обеспечивающие существенное подавление электромагнитных шумов (в т. ч. регионально коррелируемых) и надежное оценивание сразу трех передаточных операторов (импеданса, типпера и горизонтального МВ-отклика) с последующей их совместной инверсией методами, учитывающими трехмерность получаемых данных [1]. Проект KIROVOGRAD дал первый масштабный массив синхронных зондирований на постсоветском пространстве, следуя за европейскими экспериментами BEAR и EMTESZ [5, 6]. К концу 2014 г. он включал более 200 синхронных МТ/МВ-зондирований с базовыми пунктами в обл. «Киев» (KIV) и на Геофизической базе МГУ (ALX) к западу от Калуги, а также более 300 локальных зондирований, выполненных до 2006 г. Обеспечено достаточно равномерное покрытие обширной территории (49–55° с. ш., 31–38° в. д.) со сгущением наблюдений в окрестности выявленных коровых аномальных структур. Данные структуры наиболее отчетливо видны в инвариантах горизонтального МВ-отклика, имеющего повышенную чувствительность к квазилинейным субгоризонтальным проводящим аномалиям и иммунного к приповерхностным гальваническим эффектам [5, 6].

На рис. 1 показана карта изолиний максимальной амплитуды горизонтального МВ-отклика (период 400 с), рассчитанного отн. самого западного зондирования на профиле НАВЛЯ, с наложенными эллипсами экстремальных амплитуд его аномальной части. В таком представлении максимальные изолинии и большие оси эллипсов отчетливо выделяют квазилинейные коровые проводящие аномалии (Кировоградскую, КрвА, – на ЮЗ, Курскую, КурА, – на ЮВ и Кирово-Барятинскую, КбрА, – на севере), а также осадочную структуру Днепровско-Донецкой впадины, ДДВ – на юге [1, 3–5]. На рис. 2 показан 3D-образ максимальной амплитуды горизонтального МВ-отклика во всем диапазоне периодов, ха-

рактически характеризующий относительные интенсивность и глубинность выделенных аномалий, визуализируя аномальные токовые системы в пространстве.

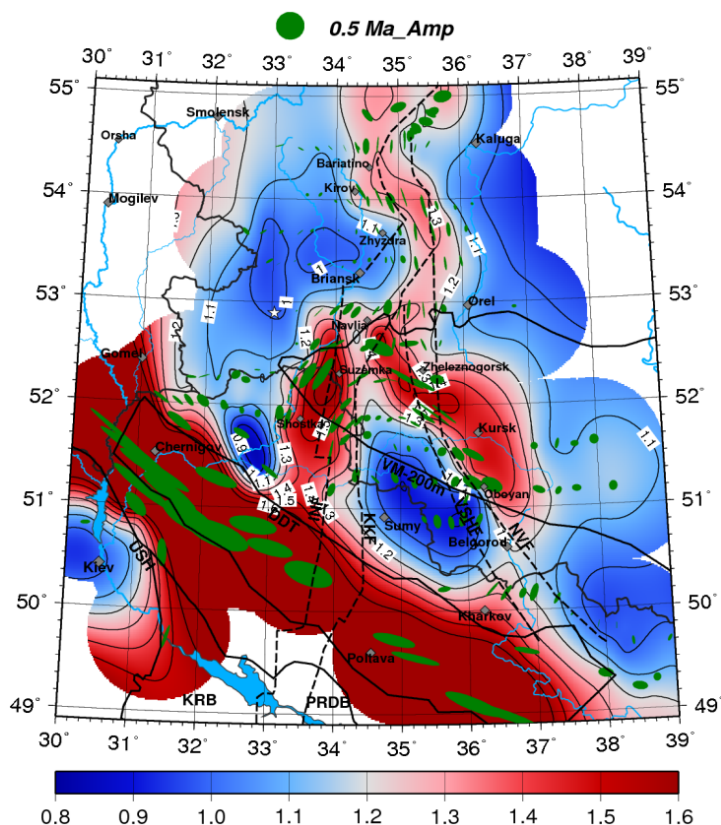


Рис. 1. Диаграммы инвариантов горизонтального МВ-отклика (отн. самого западного зондирования на профиле НАВЛЯ) для расширенного массива KIROVOGRAD:

карта изолиний максимальной амплитуды с эллипсами (повернутыми на 90°) экстремальных амплитуд его аномальной части для периода 400 с; сплошные линии – границы тектонических структур: DDT – ДДВ; USH – Украинский щит, KRB и PRDB – его Кировоградский и Приднепровский блоки; VM-200m – изолиния 200 м мощности осадков ВМ; пунктир – важнейшие глубинные разломы: INF – Западно-Ингулецко-Белопольско-Навлинский, KKF – Криворожско-Крупецкой, VSHF – Волчанско-Шаблыкинский, NVF – Новооскольско-Воронцовский; в самом верху – масштаб эллипсов (круг с равными полуосями длиной 0,5)

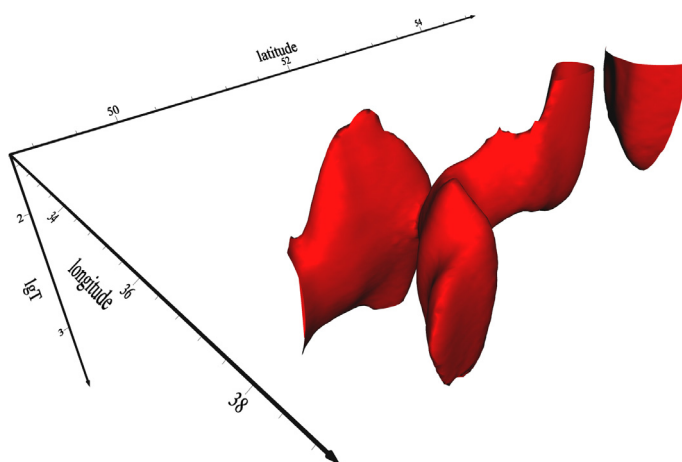


Рис. 2. Иповерхность (на уровне 1,25) максимальной амплитуды горизонтального МВ-отклика (отн. самого западного зондирования на профиле НАВЛЯ) для расширенного массива KIROVOGRAD; по горизонтальным осям – географические координаты (град.), по вертикали – период (с, lg-масштаб); данные в пределах осадочных структур ДДВ исключены

В этой связи представляется целесообразным вести решение интерпретационных обратных задач с использованием горизонтальных МВ-откликов, как в комплексе с другими МТ/МВ-данными, так и независимо от них. Результаты совместной 2D+-инверсии [6] данных импеданса, типпера и горизонтального МВ-отклика оказались весьма информативными на северных профилях массива [1–4, 6, 7]. Ниже приводятся новые результаты площадной инверсии полного тензора горизонтального МВ-оператора в рамках квази-3D-методики. Она основана на приближенном, но очень быстром пленочном модельном алгоритме с граничными условиями Прайса и тихоновской минимизации функционала невязки данных с различными стабилизаторами методом сопряженных градиентов. Первоначально она была разработана для квази-3D-инверсии типпера в однопленочной модели, интегрирующей все аномалии электропроводности [9, 10], но затем при интерпретации данных экспериментов EMTESZ и KIROVOGRAD получила существенное развитие с переходом к инверсии горизонтальных МВ-откликов и анализу многопленочных моделей [1, 4, 6, 11]. Двухпленочная реализация методики дала возможность отдельно изучать поверхностные и глубинные аномалии и, в т. ч., подбирать глубинные структуры при фиксации априорных приповерхностных представлений. Переход к инверсии полного тензора горизонтальных МВ-данных позволил в полной мере учесть их способность к прямому картированию аномальных токовых систем, а также уменьшить искажающее влияние токовых систем, текущих за пределами области инверсии, весьма существенное для данных типпера [1, 5].

Актуальная модель квази-3D-инверсии МВ-данных массива KIROVOGRAD включает горизонтально-слоистую структуру с сопротивлениями слоев, сверху вниз: 1000, 300, 100 и 30 Ом·м и мощностями по 100 км. Неоднородные пленки располагаются на глубинах 2 и 20 км, имеют равномерную дискретизацию 20 км по широте и 10 км по долготе симметрично относительно точки (52°N, 34,5°E) и являются однородными на периферии (вне области рис. 1) с фоновыми продольными проводимостями 100 и 400 См соответственно. Структура верхней пленки определяется путем осреднения оценок приповерхностной продольной проводимости по эффективным МТ-кривым массива KIROVOGRAD и другим априорным данным [1] и фиксирована в ходе инверсии (рис. 3, а). Продольные проводимости в ячейках нижней пленки (общим числом ~2500) оптимизируются. Вместе инвертируются все компоненты горизонтального МВ-оператора (рассчитанного отн. самого западного зондирования на профиле НАВЛЯ, рис. 1) для заметно расширенного в 2013–2014 гг. (по сравнению с предшествующими решениями подобной обратной задачи [1, 4]) массива зондирований KIROVOGRAD. Реализуется выбор оптимального параметра регуляризации [10]. В итоге удается быстро и устойчиво оценить продольную проводимость субгоризонтальных аномалий электропроводности. При этом необходим контроль точности условий Прайса и возможны искажения при «многоэтажной», гальванически связанной структуре аномалий. На рис. 3, б–г приведены три частных решения задачи квази-3D-инверсии для периодов 400, 1600 и 3600 с. Робастные абсолютные невязки (Q_{67} , [7]) по всей совокупности компонент составляют 0,097; 0,104 и 0,122, а относительные L_2 (с нормировкой на эффективную амплитуду) – 14,0; 14,3 и 15,9 %.

Показанные распределения коровой продольной проводимости выгодно отличаются от предшествующих решений задачи [1, 4]. Уточненная модель продольной проводимости осадков ДДВ позволила уменьшить интенсивность ложных коровых аномалий в ее пределах, вызванных погрешностями пленочной аппроксимации. Подобные аномалии теперь возникают лишь на окраинах южного борта ДДВ и могут также отражать влияние бортовых зон глубинных разломов. Существенно «сфокусированы» аномальные коровые структуры. Их восточная ветвь (КурА и КбрА) про-

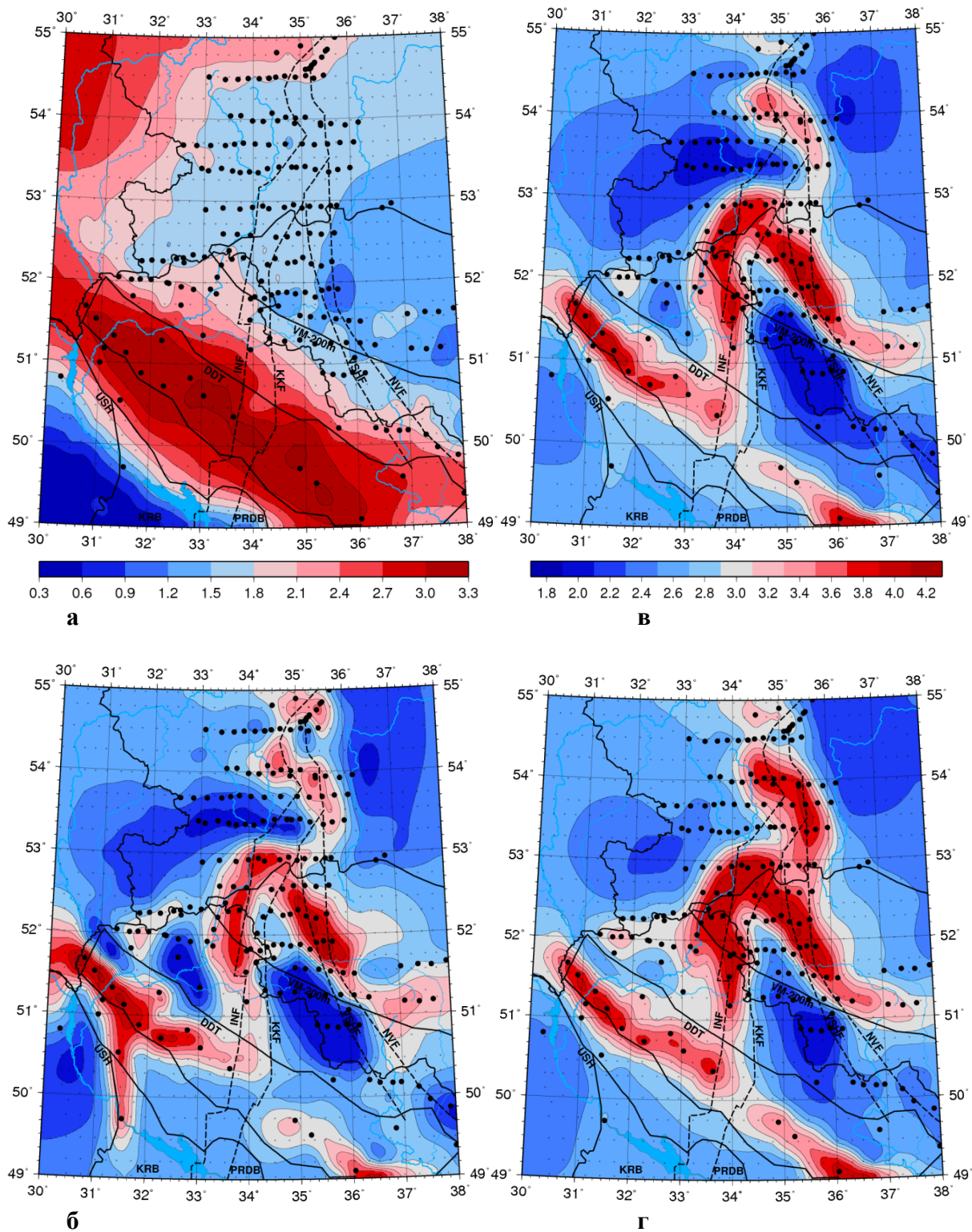


Рис. 3. Продольная проводимость (Cm, Ig-масштаб) в модели квази-3D-инверсии горизонтального МВ-отклика в эксперименте KIROVOGRAD:
 а – в верхней «осадочной» пленке, б–г – в нижней «коровой» пленке для инверсии на периодах 400, 1600 и 3600 с соответственно

слежена в большем числе зондирований и отчетливо совпадает в плане с полосой ярких положительных магнитных аномалий – Курской и Барятинской [2–4]. Ее северное окончание отделилось от бортовых структур Московской синеклизы, а про-

должение на ЮВ приобрело выраженное ЮВВ простираение. Структура КрвА проявилась под осадками ДДВ и приняла более слитную форму севернее. Продольная проводимость на осях КрвА и КурА приближается к уровню 10^4 См, а на оси КбрА локально достигает уровня 5000 См. Уточнение получила область сочленения КрвА, КурА и КбрА к ЮВ от Брянска. В модели инверсии для периода 400 с (рис. 3, б) выделился еще один меридианальный верхнекоровый проводник – вдоль западной границы Кировоградского блока Украинского щита и далее под ДДВ на север до границ с Россией и Белоруссией.

Полученные решения подлежат дальнейшему уточнению по результатам 11 новых зондирований 2015 г. на ЮВ окончании КурА и северном – КбрА. На их основе, а также по результатам совместных профильных 2D+-инверсий МТ/МВ-данных строятся адекватные начальные модели для задач 3D-инверсии, решаемых в настоящее время по всей совокупности данных по программе ModEM [12].

Авторы благодарны участникам рабочей группы KIROVOGRAD [1]. Особая признательность – украинским ученым Т. К. Бурахович, А. Н. Кушниру, И. М. Логвинову, В. Н. Тарасову за возможность включения в базу данных KIROVOGRAD результатов их зондирований 2012–2014 гг. и белорусскому исследователю В. Н. Астапенко за содействие в интеграции данных белорусских зондирований 1990-х годов.

Библиографический список

1. Варенцов Ив. М. Синхронные МТ- и МВ-зондирования на западном склоне Воронежского массива / Ив. М. Варенцов, С. Ковачикова, В. А. Куликов [и др.] // Геофиз. журн. – 2012. – Т. 34 (4). – С. 90–107.
2. Абрамова Д. Ю. Корреляция аномалий постоянного магнитного поля и коровых геоэлектрических структур на западном склоне Воронежского массива / Д. Ю. Абрамова, Л. М. Абрамова, Ив. М. Варенцов [и др.] // Геофизический журнал. – 2012. – Т. 34. – № 4. – С. 62–69.
3. Алексанова Е. Д. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы / Е. Д. Алексанова, Ив. М. Варенцов, В. А. Куликов [и др.] // Геофизика. – 2013. – № 2. – С. 32–38.
4. Варенцов Ив. М. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы) / Ив. М. Варенцов, В. В. Гордиенко, И. В. Гордиенко [и др.]. – Киев : Логос, 2013. – 118 с.
5. Varentsov Iv. M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis and inversion / Iv. M. Varentsov // EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice. – Elsevier, 2015. – P. 271–299.
6. Varentsov Iv. M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis / Iv. M. Varentsov // EM sounding of the Earth's interior (Methods in geochemistry and geophysics, 40). – Elsevier, 2007. – P. 263–277.
7. Varentsov Iv. M. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets / Iv. M. Varentsov // EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice. – Elsevier, 2015. – P. 191–229.
8. Варенцов Ив. М. Массив МТ/МВ-зондирований KIROVOGRAD: сопоставление геоэлектрических моделей на северных профилях КИРОВ, ЖИЗДРА и БРЯНСК / Ив. М. Варенцов, И. Н. Лозовский, Л. М. Абрамова [и др.] // Вопросы естествознания. – 2016. – № 3. – С. 53–58.
9. Cerv V. Modelling of conductivity structures generating anomalous induction at the eastern margin of the Bohemian Massif and the West Carpathians / V. Cerv, S. Kovacikova, J. Pek [et al] // Acta Geophys. – Pol. 2002. – Vol. 50 (4). – P. 527–545.
10. Kovacikova S. Modelling of the conductance distribution at the eastern margin of the European Hercynides / S. Kovacikova, V. Cerv, O. Praus // Stud. Geophys. Geod. – 2005. – Vol. 49. – P. 403–421.
11. Kovacikova S. EMTESZ and KIROVOGRAD WGs. Quasi-3D inversion of horizontal MV responses / S. Kovacikova, Iv. M. Varentsov // EM soundings: theory and applications (Proc. Int. Workshop on EM sounding in memory of Professors Mark N. Berdichevsky and Peter Weidelt). – M. : IPE RAS, 2010. – P. 45–46.
12. Egbert G. Computational recipes for EM inverse problems / G. Egbert, A. Kelbert // Geophys. J. Int. – 2012. – Vol. 189. – P. 251–267.



УДК 550.837

*Ив. М. Варенцов^{^1}, П. В. Иванов^{^1}, И. Н. Лозовский^{^1}, рабочая группа KIROVOGRAD***МАССИВ МТ/МВ-ЗОНДИРОВАНИЙ KIROVOGRAD:
ОТ 2D+ К 3D-ИНВЕРСИИ НА ПРОФИЛЕ ЖИЗДРА***

Аннотация. Представлены последние результаты интерпретации синхронных магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) данных на профиле ЖИЗДРА, входящем в площадной массив зондирований KIROVOGRAD, развернутый на западном склоне Воронежского массива. Исследование фокусируется на переходе от 2D+ к объемной 3D-инверсии МТ/МВ-данных. Геоэлектрический разрез вдоль профиля ЖИЗДРА, ранее полученный с помощью 2D+-инверсии, был преобразован в начальную модель для задачи 3D-инверсии сводного ансамбля данных, имеющихся на данном профиле. Обсуждаются результаты 3D-инверсии в сравнении с исходной 2D-моделью, сопоставляются достигнутые уровни невязок данных.

Ключевые слова: Воронежский массив, синхронные зондирования, МТ/МВ-отклики, 2D+ и 3D-инверсия, оценки невязок.

Об авторах:

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

*Iv. M. Varentsov, P. V. Ivanov, I. N. Lozovskiy, Working Group KIROVOGRAD***KIROVOGRAD MT/MV SOUNDING ARRAY:
FROM 2D+ TO 3D INVERSION AT THE ZHIZDRA PROFILE**

Abstract. The latest results in the interpretation of simultaneous magnetotelluric (MT) and magnetovariational (MV) data at the ZHIZDRA profile within the KIROVOGRAD sounding array at the western slope of the Voronezh Massive are presented. The study has a focus on the transition from 2D+ to volume 3D MT/MV data inversion. The starting model for 3D inversion solutions is based on geoelectric section derived within 2D+ inversion of joint MT/MV dataset. All available data for the single ZHIZDRA profile are further inverted in 3D. Resulting 3D models are compared with initial 2D section, and data misfit estimates are investigated.

Keywords: Voronezh Massive, simultaneous soundings, MT/MV responses, 2D+ and 3D inversion, misfit estimates.

Методика и результаты построения массива синхронных МТ/МВ-зондирований KIROVOGRAD на западном склоне Воронежского массива обсуждаются в ряде недавних публикаций [1–4] и представлены в материалах [5, 6]. Субширотный профиль ЖИЗДРА проходит по 53,7° с. ш. и выделяется в данном массиве высоким качеством полученных данных и их сравнительно малой 3D-искаженностью (рис. 1). Результаты 2D-инверсии различных компонент МТ/МВ-данных на профиле ЖИЗДРА по нескольким методикам рассмотрены в работах [1, 3, 4]. Осенью 2013 г. три дополнительных зондирования ZA-ZC были выполнены на западном окончании профиля, а летом 2014 г. между точками Z0 и Z1 было проведено еще одно контрольное зондирование. После

* Представленные исследования поддержаны грантом РФФИ 13-05-12094.

этого была произведена новая инверсия по технологии 2D+ [2, 7, 8] для расширенного профильного массива данных (рис. 1).

Для инверсии в 14 точках профиля были использованы 8 компонент передаточных операторов: двух мод импеданса (EP и HP, в каждой моде – кажущееся сопротивление, фаза), типпера (Re, Im) и горизонтального МВ-отклика (модуль, фаза). В качестве фаз импеданса брались соответствующие элементы его фазового тензора. Данные импеданса и типпера задавались для периодов 0,25–4096 с, горизонтального МВ-отклика – для периодов 32–4096 с. Погрешности данных в инверсии увеличивались пропорционально степени их искаженности 3D-эффектами [2, 7]. Для подавления статических искажений погрешности кажущихся сопротивлений были дополнительно увеличены в 5–40 раз.

Дискретизация модели в нижнем полупространстве была выполнена на неравномерной сетке размерностью 74×48 ячеек. Оптимизировалось ~2200 lg -сопротивлений ячеек в схеме с координированными изменениями параметров близких ячеек [7, 8]. Ячейки с оптимизируемыми сопротивлениями лежали на глубинах до 100 км, ниже подбирались лишь сопротивления слоев лежащей в основании 1D-модели. Стартовая модель задавалась в виде 1D-структуры. Для рассмотренного ансамбля данных получено несколько десятков решений задачи 2D+-инверсии с разными параметрами стабилизации и весами отдельных компонент.

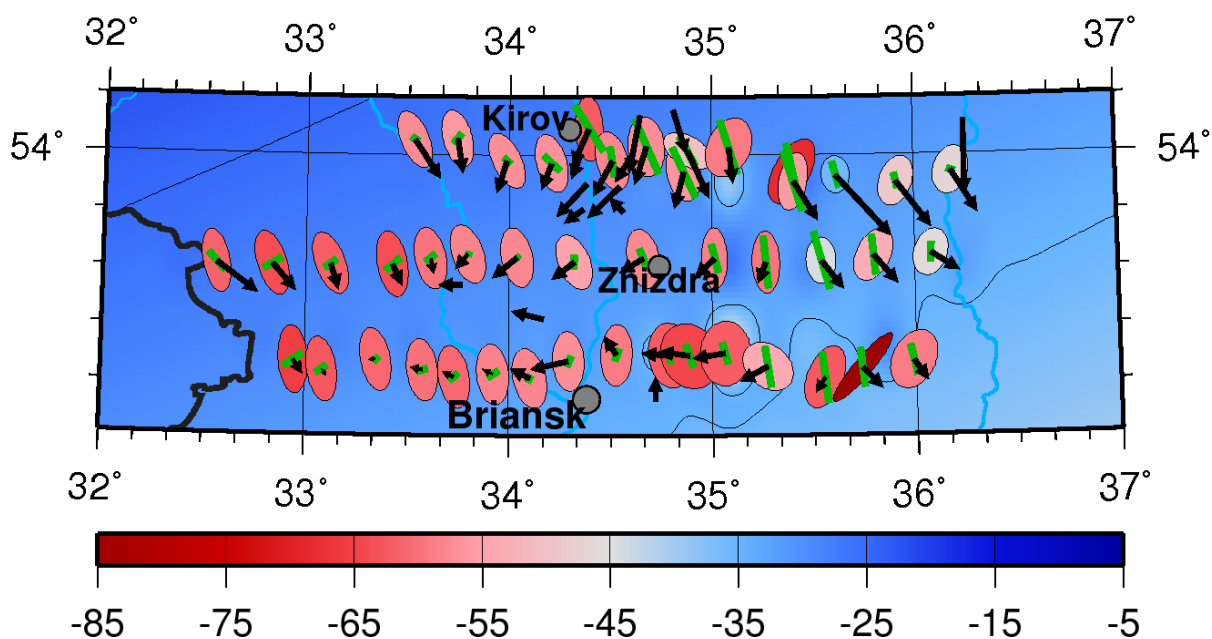


Рис. 4. Инварианты МТ/МВ передаточных операторов для периода 400 с в окрестности профиля ЖИЗДРА:

цветная карта показывает минимальную (по абс. величине) фазу из фазового тензора импеданса; эллипсы (повернутые на 90°) представляют величины и азимуты двух экстремальных (по абс. величине) фаз этого тензора; цвет заполнения эллипсов соответствует максимальной (по абс. величине) фазе фазового тензора; зеленые отрезки (повернутые на 90°) отображают максимальные амплитуды и азимуты аномальной части горизонтального МВ-отклика; черные стрелки – действительные векторы индукции Визе

Сопоставление невязок данных для полученных решений в условиях отмеченной выше модификации исходных погрешностей данных велось по массивам абсолютных невязок отдельных компонент. Эти невязки оценивались традиционно в норме L2 и робастно с помощью порядковой статистики – квантиля 2/3 (Q67) [7]. Было выбрано решение с минимальными невязками, а также проведено робастное осреднение моделей (массивов lg -сопротивлений) для 10 решений с «лучшими» не-

вязками. Осредненная модель уточнялась серией дополнительных итераций 8-компонентной инверсии.

На рис. 2 показана геоэлектрическая модель для решения с минимальными невязками. Абсолютные невязки Q67 здесь составили $3,56/8,81^\circ$ для фаз импеданса (HP/EP), $0,077/0,045$ – для типпера (Re/Im) и $0,045$ – для амплитуды горизонтального МВ-отклика. Качество подбора отдельных компонент представлено на рис. 3. Геоэлектрическая структура данной модели подробно обсуждается и сопоставляется с результатами аналогичных 2D+-инверсий на смежных профилях БРЯНСК и КИРОВ в работе [5].

Данная модель послужила начальным приближением в первых экспериментах 3D-инверсии полного ансамбля МТ/МВ-данных (теперь 20-компонентного, а не 8-компонентного, как в 2D-случае), заданных на одном лишь профиле ЖИЗДРА. Цель этих экспериментов заключалась в изучении изменений модельной структуры в окрестности профиля по результатам 3D-инверсии в сравнении с исходным 2D-разрезом, а также в сравнительном изучении абсолютных невязок отдельных компонент данных в 2D- и 3D-решениях. Данный анализ предваряет более трудоемкий этап решения 3D обратных задач по серии профилей массива KIROVOGRAD. Информативность подобных сопоставлений признается многими исследователями и специально изучалась в работах [9, 10].

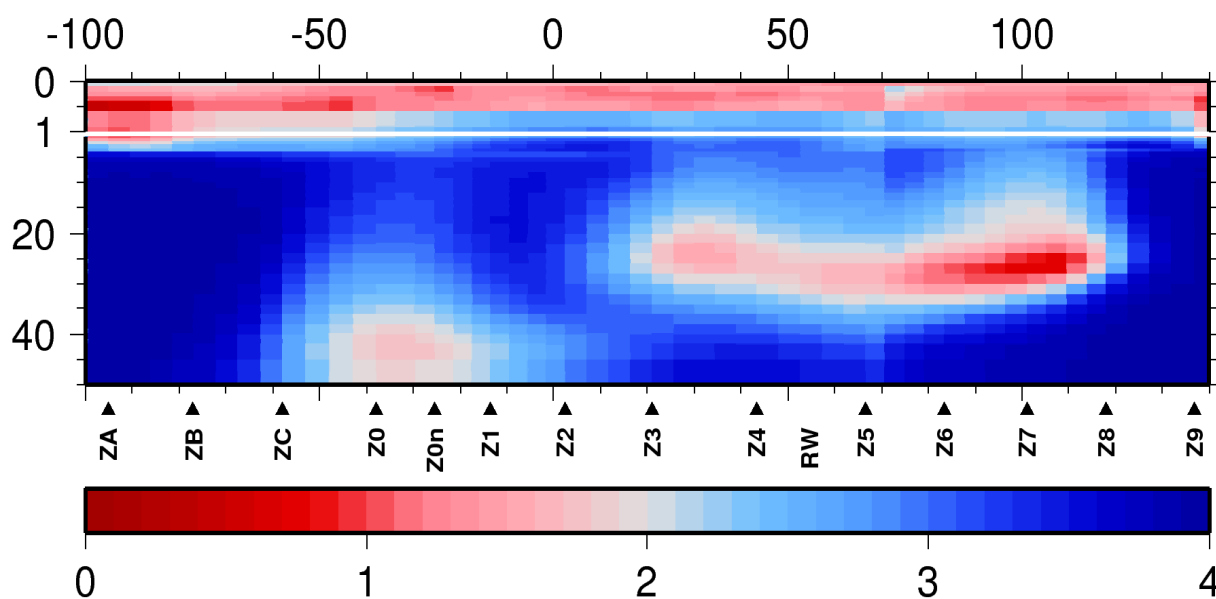


Рис. 5. Разрез сопротивлений (Ом·м, lg -масштаб) вдоль профиля ЖИЗДРА по результатам 8-компонентной 2D+-инверсии МТ/МВ-данных с минимальными невязками; все координаты – в км, начало координат – на меридиане 34° в. д., запад – слева, восток – справа, интервал глубин 0–1 км детализирован, RW – положение ж/д на переменном токе

Основным инструментом 3D-инверсии МТ/МВ-данных на профиле ЖИЗДРА стала программа ModEM [11], позволяющая вести совместную инверсию данных импеданса, типпера и горизонтального МВ-отклика. Дополнительно для инверсии одних лишь данных импеданса использовалась программа WSInv3DMT [12]. Для обеих программ подготовлены программные средства анализа результатов инверсии, обеспечивающие единообразный расчет абсолютных норм (среднеквадратических и робастных) для невязок отдельных компонент данных и их погрешностей, согласованных с аналогичными оценками по результатам 2D+-инверсии.

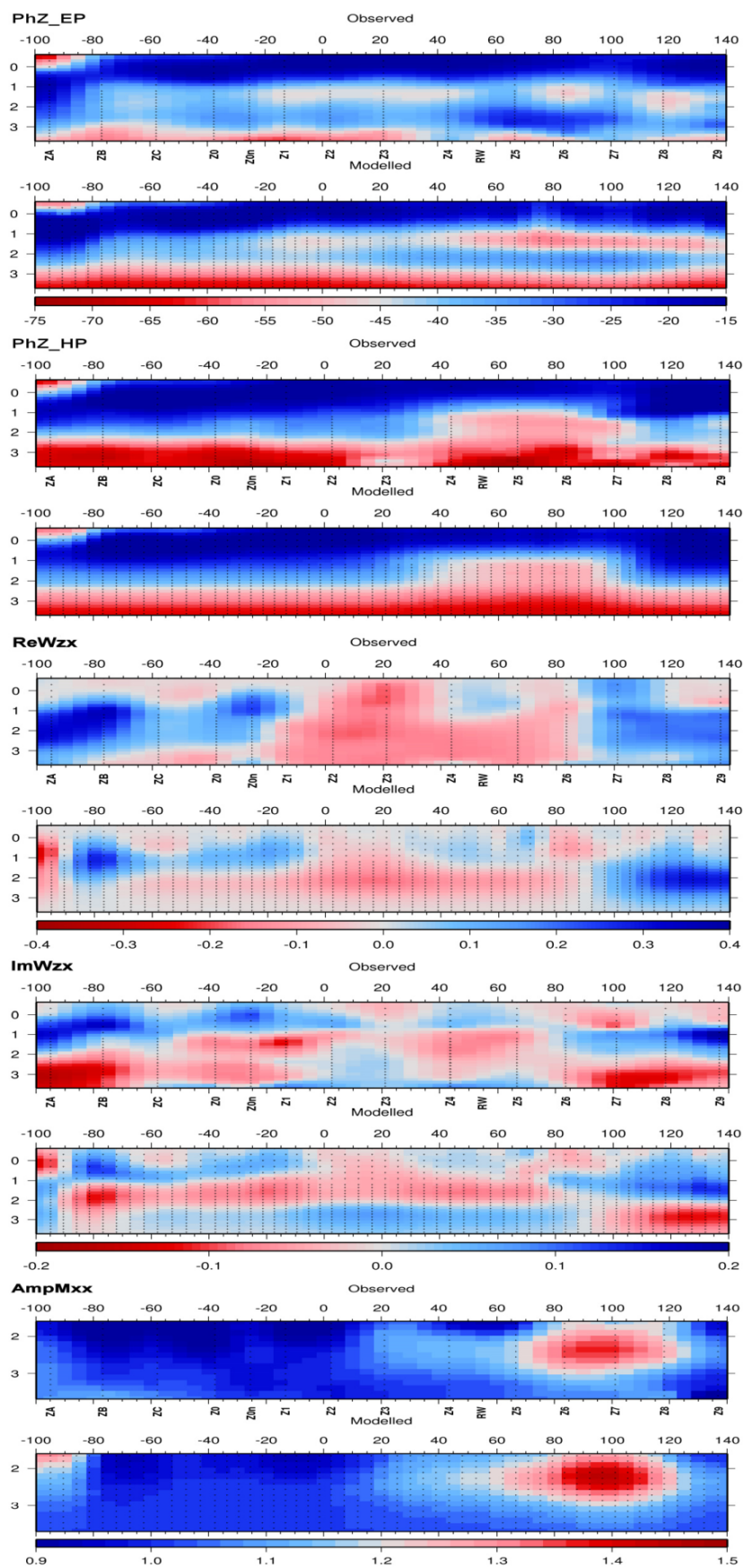


Рис. 6. Сопоставление псевдоразрезов наблюдаемых и модельных данных на профиле ЖИЗДРА для решения 2D обратной задачи, показанной на рис. 2, сверху вниз: фазы импеданса (EP и HP, град.), компоненты типпера (Re, Im) и амплитуда горизонтального МВ-отклика; горизонтальные оси – как на рис. 2, вертикальные оси – период (с, lg-масштаб)

Библиографический список

1. Варенцов Ив. М. Синхронные МТ- и МВ-зондирования на западном склоне Воронежского массива / Ив. М. Варенцов, С. Ковачикова, В.А. Куликов [и др.] // Геофиз. журн. – 2012. – Т. 34 (4). – С. 90–107.
2. Varentsov Iv. M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis and inversion / Iv. M. Varentsov // EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice. – Elsevier, 2015. – P. 271–299.
3. Алексанова Е. Д. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы / Е. Д. Алексанова, Ив. М. Варенцов, В. А. Куликов [и др.] // Геофизика. – 2013. – № 2. – С. 32–38.
4. Варенцов Ив. М. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы) / Ив. М. Варенцов, В. В. Гордиенко, И. В. Гордиенко [и др.]. – Киев : Логос, 2013. – 118 с.
5. Варенцов Ив. М. Массив МТ/МВ-зондирований KIROVOGRAD: сопоставление геоэлектрических моделей на северных профилях КИРОВ, ЖИЗДРА и БРЯНСК / Ив. М. Варенцов, И. Н. Лозовский, Л. М. Абрамова [и др.] // Вопросы естествознания. – 2016. – № 3. – С. 53–58.
6. Варенцов Ив. М. Массив МТ/МВ-зондирований KIROVOGRAD: квази-3D-инверсия горизонтальных МВ-откликов / Ив. М. Варенцов, П. В. Иванов, С. Ковачикова [и др.] // Вопросы естествознания. – 2016. – № 4. – С. 47–52.
7. Варенцов Ив. М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах / Ив. М. Варенцов // Физика Земли. – 2002. – № 11. – С. 11–33.
8. Varentsov Iv. M. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets / Iv. M. Varentsov // EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice. – Elsevier, 2015. – P. 191–229.
9. Иванов П. В. Возможности интерпретации МТ-данных, полученных на одиночном профиле, при изучении 3D-среды / П. В. Иванов, П. Ю. Пушкарёв // Физика Земли. – 2010. – № 9. – С. 3–10.
10. Иванов П. В., Пушкарёв П. Ю. 3D-инверсия рассчитанных на одиночном профиле МТ-данных / П. В. Иванов, П. Ю. Пушкарёв // Физика Земли. – 2012. – № 11–12. – С. 91–96.
11. Egbert G. Computational recipes for EM inverse problems / G. Egbert, A. Kelbert // Geophys. J. Int. – 2012. – Vol. 189. – P. 251–267.
12. Siripunvaraporn W. 3D MT inversion: an introductory guide for developers and users / W. Siripunvaraporn // Surv. Geophys. – 2012. – Vol. 33. – P. 5–27.



УДК 550.837.211

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

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

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

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

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, МТ/МВ-зондирования, Ладожская аномалия, Балтийский щит.

Об авторах:

^{^1} МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва.

^{^2} СПбГУ, Санкт-Петербург.

^{^3} ООО «Северо-Запад», Москва.

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

^{^5} Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва.

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

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

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

Keywords: *magnetotelluric sounding, MT/MV soundings, Ladoga anomaly, Baltic shield.*

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

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

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

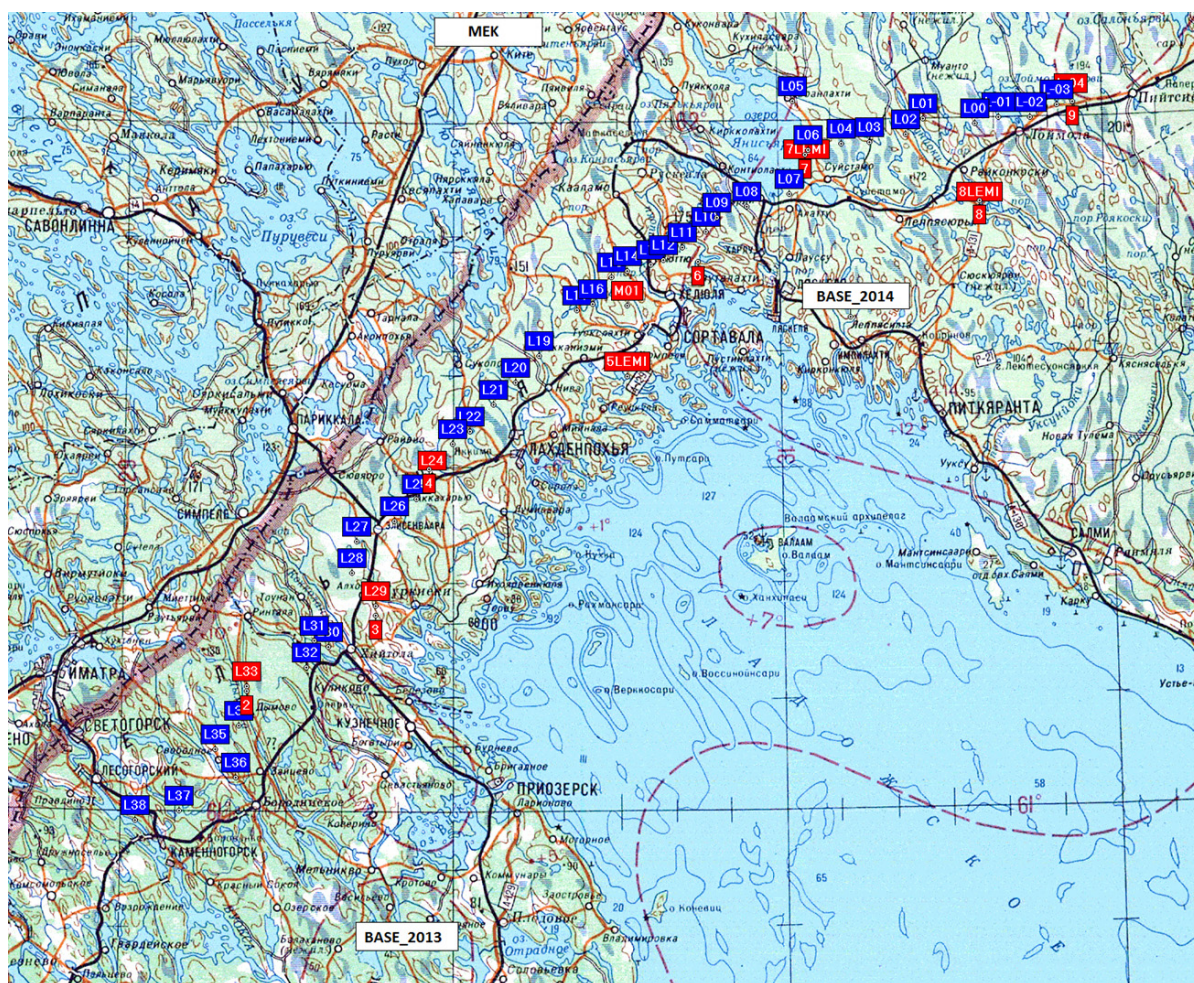


Рис. 7. Положение базовых пунктов непрерывных МТ/МВ-наблюдений 2013 и 2014 гг. и точки рядовых пятикомпонентных зондирований:
 трехсуточных с аппаратурой LEMI-417M (красный цвет) и односуточных с аппаратурой MTU-5 (красный цвет для точек, данные которых объединялись с данными трехсуточных зондирований, и синий цвет для остальных точек)

Обработка данных проводилась в синхронном режиме, позволяющем подавить влияние локальных источников промышленных помех вблизи точек наблюдения. Синхронные записи были выполнены в базовых точках к западу от Ладожского озера в обсерватории «Красное» (2013 г.), а также к востоку от озера (2014 г.). При обработке низкочастотных данных использовались записи финских обсерваторий.

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

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

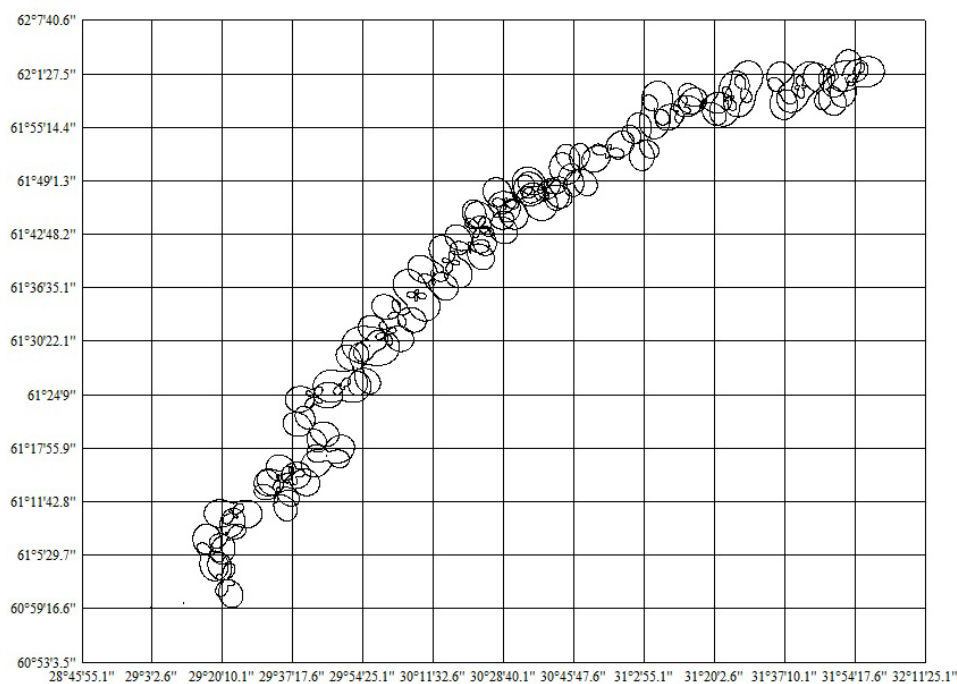


Рис. 8. Карта амплитудных полярных диаграмм тензора импеданса на профиле Выборг – Суоярви на периоде 10 с

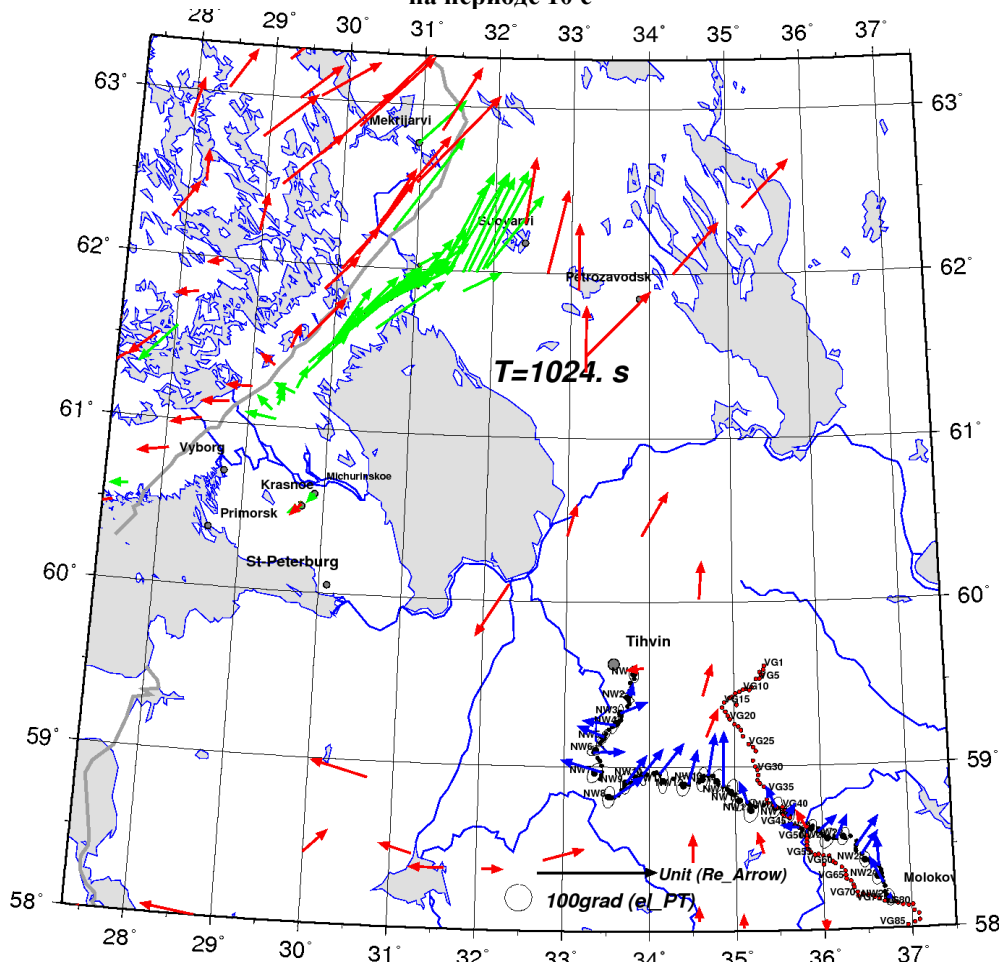


Рис. 9. Вещественные индукционные стрелки (в конвенции Визе – смотрят от проводников) на профиле Выборг – Суоярви (зеленый цвет), на участке профиля I-EВ (синий цвет) и по материалам других исследований в регионе (красный цвет)

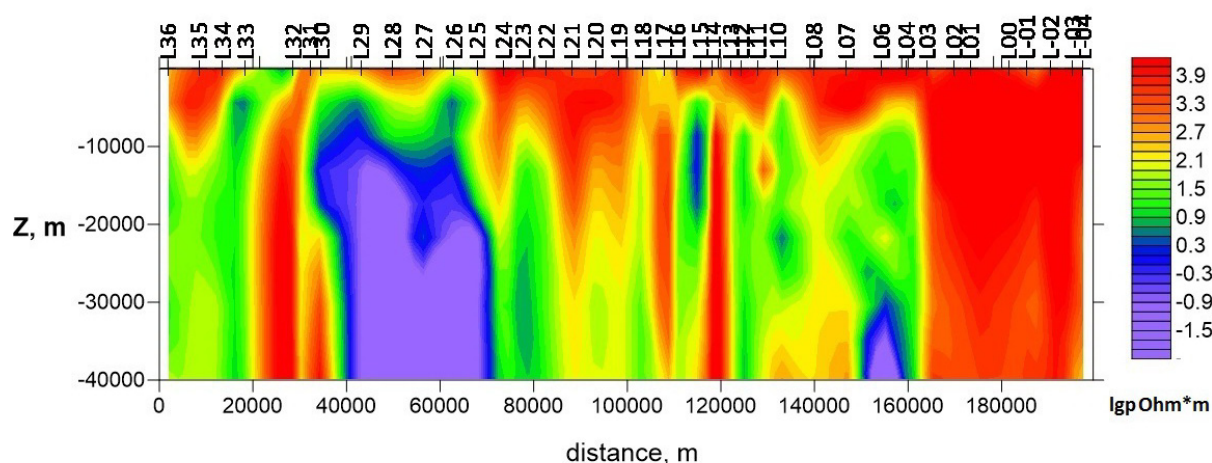


Рис. 10. Геоэлектрический разрез по линии Выборг – Суоярви, построенный по результатам предварительной сглаживающей 1D-инверсии эффективного импеданса

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

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

Библиографический список

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



УДК 550.837

Ю. А. Давыденко^{1, 2}, В. А. Белов¹, Н. А. Лаврентьева¹, К. Ю. Ткачева¹,
А. А. Демин³

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ (ЭМЗ-ВП) НА СРЕЛЬЦОВСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ

Аннотация. По оценкам экспертов, в ближайшее время Россия полностью лишится разведанных запасов урана в недрах. Если решение проблемы обеспечения АЭС топливом не будет найдено, Россия

может превратиться из крупнейшего экспортера урана в его импортера. В связи с этим имеется острая необходимость в доразведке известных месторождений урана и в поиске и разведке новых. В работе показан результат применения импульсной электроразведки с заземленными источниками и приемниками на эталонных объектах Стрельцовского рудного поля. Показано, что аномалии поляризуемости, полученные в результате инверсии данных электромагнитных зондирований в рамках модели с частотной дисперсией электропроводности, соответствуют ореолам известных месторождений.

Ключевые слова: заземленная линия, уран, полиметаллы, электромагнитные зондирования.

Об авторах:

^{^1} ИРНТУ, Иркутск.

^{^2} Институт земной коры СО РАН, Иркутск.

^{^3} Федеральное государственное унитарное геологическое предприятие «Урангеологоразведка», Байкальский филиал «Сосновгеология», Иркутск.

Y. A. Davidenko, V. A. Belov, N. A. Lavrenteva, K. Y. Tkacheva, A. A. Demin

THE RESULTS OF APPLYING THE TECHNOLOGY OF ELECTROMAGNETIC SOUNDING AND INDUCED POLARIZATION ON STRELTSOVSKOYE ORE FIELD

Abstract. According to experts, in the near future Russia would be deprived of explored reserves of uranium in the subsurface and, if the problem of providing the nuclear power plants with fuel is not solved, Russia may shift from the largest exporter of uranium to its importer. In this connection, there is a pressing need for more exploration of known deposits and the prospecting and exploration of new. The paper shows the results of applying pulse electrical prospecting with grounded sources and receivers on the reference objects of Streltsova ore field. It is shown that the anomalies of the polarizability resulting from inversion of electromagnetic sounding data in the model with frequency dispersion of conductivity correspond to the halos of known deposits.

Keywords: grounded line, uranium, base metals, electromagnetic sounding.

Исследования Приаргунья на предмет месторождений урана и полиметаллов проводились с середины прошлого века. Выполнялись аэро- и наземные поиски, в результате которых было выявлено множество рудопоявлений. Следует отметить, что все месторождения Стрельцовского рудного поля не выходят на дневную поверхность, и это вызывает сложности при поисках. В настоящее время на Стрельцовском рудном поле проводятся исследования различными методами, разрешающая способность которых позволила бы выделить месторождения, которые находятся в фундаменте и уходят вглубь.

Осенью 2014 г. сотрудниками лаборатории комплексирования геофизических методов поиска ИРНТУ были проведены полевые работы на Стрельцовском рудном поле. Участок расположен на юге Забайкальского края в 12 км от города Краснокаменск и занимает территорию общей площадью 120 тыс. км². Ввиду большой индустриализации района (ЛЭП, железнодорожные пути, работающие горные выработки и пр.), участок работ характеризуется высоким уровнем промышленных помех. Целью работ являлась оценка эффективности применения метода ЭМЗ-ВП на урановых месторождениях Стрельцовского рудного поля.

При обработке полевых данных в первую очередь было проведено подавление периодической техногенной помехи на исходных данных. Алгоритм подавления техногенных периодических помех реализован в программе первичной обработки

данных GDF_Slicer, которая входит в программную часть электроразведочного комплекса «МАРС». Суть этого алгоритма заключается в применении дифференцирующего нерекурсивного фильтра в сочетании с робастной фильтрацией в скользящем окне.

Одномерная инверсия данных электромагнитных зондирований с учетом частотной дисперсии электропроводности в рамках модели Cole – Cole проводилась в программном комплексе Mars 1D [4, 5] (рис. 1).

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

где ω – частота; i – мнимая единица; ρ – удельное электрическое сопротивление; ρ_0 – сопротивление на постоянном токе; η – коэффициент поляризуемости $0 \leq \eta \leq 1$; τ – время релаксации; c – показатель степени $0 \leq c \leq 1$.

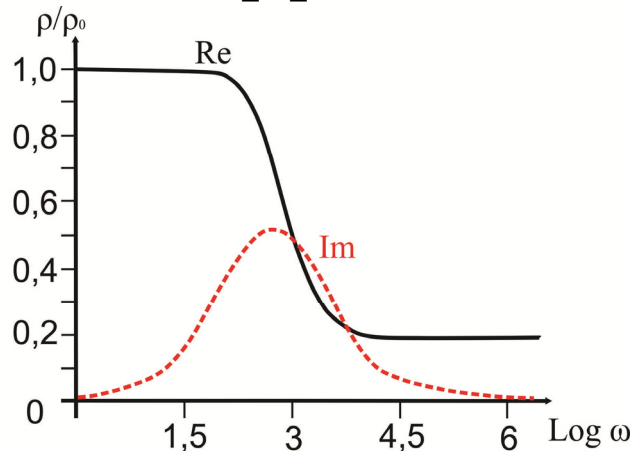


Рис. 11. Зависимость эффективного удельного сопротивления от частоты, соответствующая формуле Коула – Коула

При создании опорной модели использовались результаты интерпретации данных МПП в рамках одномерной поляризующейся модели, выполненной по полевым материалам ФГУПП «Урангео». МПП и ЭМЗ-ВП были выполнены по одним и тем же профилям. Кроме того, при моделировании учитывалось большое количество фактических данных о геологическом строении участка, составленное по результатам бурения и гравиразведки. В первую очередь, принималось во внимание характерное для Стрельцовского рудного поля разделение на верхний структурный этаж, нижний структурный этаж и фундамент.

В результате подбора наблюдаются эффекты эквивалентности между логарифмом удельного электрического сопротивления, поляризуемостью, логарифмом времени релаксации и показателем степени. Для уменьшения эффекта эквивалентности был использован аппарат робастного регрессионного анализа, реализованный в программном комплексе GelioSMI-64 [1]. В программе реализован робастный вариант регрессии в виде итерационной процедуры с последовательным уточнением прогноза на основе уточнения весов регрессоров (входных переменных). Под робастностью в статистике понимают нечувствительность к различным отклонениям и неоднородностям в выборке, связанным, в общем случае, с неизвестными причинами [4]. Таким образом, удалось учесть вклад, вносимый изменчивостью регрессоров τ и c в целевые переменные – ρ и η . Во времени релаксации τ также было учтено влияние показателя степени c . Выявленные регрессионным анализом вклады регрессоров были вычтены из значений выходных переменных ρ , η и τ . Далее, с целью для анализа этого мерного массива данных, был использован метод главных компонент (МГК).

На рис. 2 проиллюстрирован результат интерпретации данных ЭМЗ-ВП по трем параметрам: удельному электрическому сопротивлению, поляризуемости и времени релаксации. Все три геоэлектрических разреза сопоставлены с геологическим разрезом и схемой тектонических нарушений. На разрезы были нанесены контуры рудных тел, взятые с карты рудоносности. Вопрос с точной привязкой положения рудных тел по глубине был решен уже после того, как был получен данный вариант интерпретации. Большинство выявленных ураново-рудных объектов тяготеют к границе верхнего и нижнего структурных этажей, на глубинах порядка ста метров.

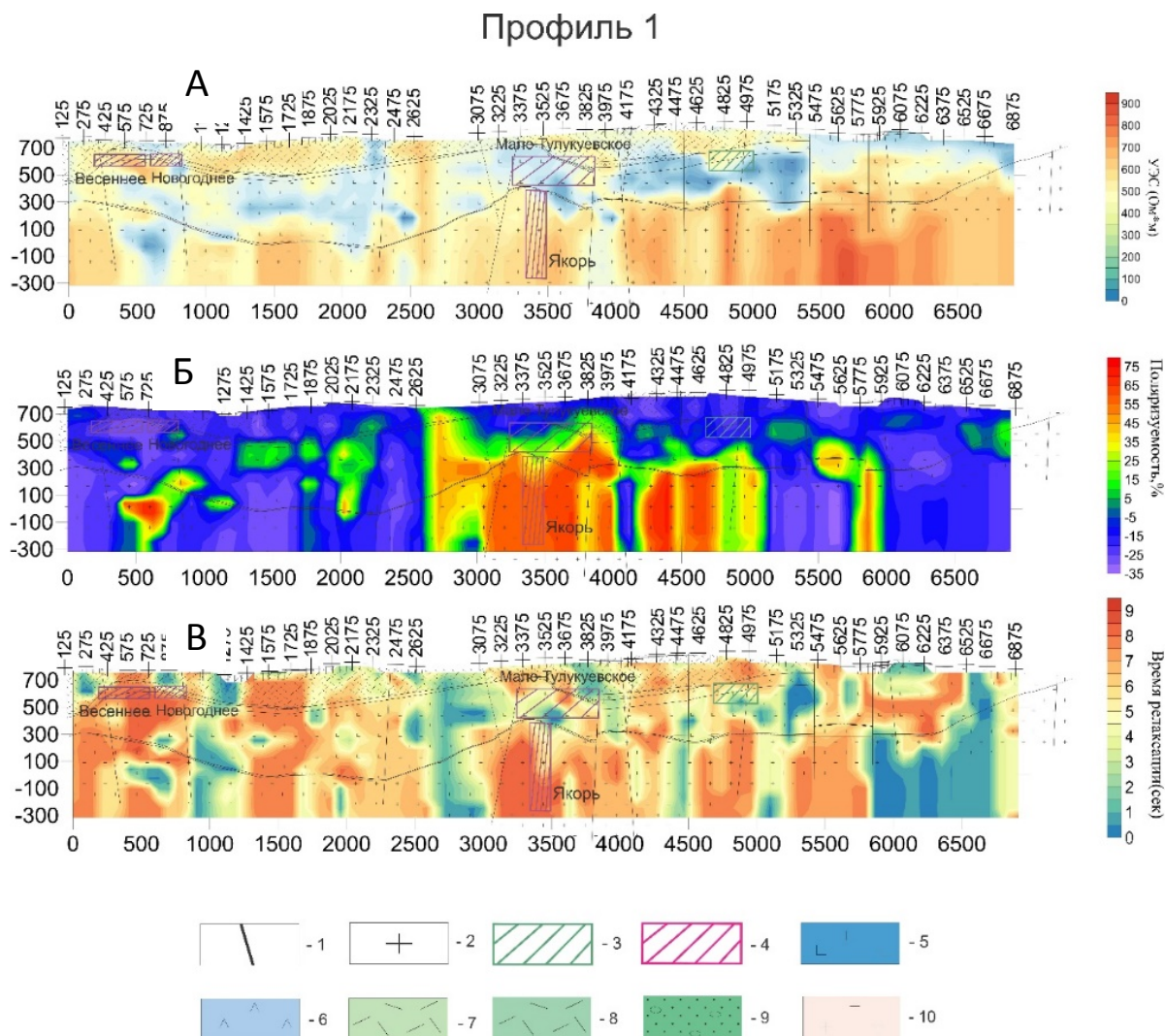


Рис. 12. Разрез по профилю 1, УЭС (а) поляризуемости (б) и времени релаксации (в) ЭМЗ-ВП:
 1 – тектонические разломы; 2 – пикеты; 3 – рудная залежь; 4 – урановая рудная залежь, 5 – базальты, андезит-базальты; 6 – риодациты; 7 – порфиоровые (липариты); 8 – микрофельзитовые (фельзиты), 9 – базальные конгломераты, гравелиты, песчаники, 10 – биотитовые граниты

Согласно карте рудоносности профиль проходит через три зоны с рудопроявлениями, два из них, месторождение «Новогоднее» в области с 675 по 825 пикеты и месторождение «Мало-Тулукуевское» в области с 3475 по 3575 пикеты, эти зоны находятся в осадочном чехле. Месторождение «Якорь» залегает в породах фундамента, два других в осадочном чехле и пересекается профилем на пикетах с 3425 по 3475.

На разрезе параметра поляризуемости месторождения «Якорь» и «Мало-Тулукуевское» совпадают с зоной высоких значений поляризуемости, также эта зона

проявляется и более высокими значениями времени релаксации. Показатель поляризуемости в массивах эффузивных и подстилающих гранитоидных пород, определенных по методу сопротивлений, позволяет надежно выявить именно высокоминерализованные области. Возможно, это связано с тем, что урановая минерализация на месторождениях Стрельцовской кальдеры находится в ассоциации с молибденитом, вкрапленным сульфидным оруденением: пиритом, магнетитом и другими хорошо поляризующимися минералами. Данный факт четко прослеживается на профиле 1. По данным МПП вся эта область выглядит единым массивом высоких сопротивлений, а на геологическом разрезе представляет собой разуплотненный тектоническими нарушениями в вышеобозначенных интервалах массив горных пород. Выделенные в результате формализованного подхода с использованием метода главных компонент тектонические нарушения секут гранитоидный массив и вышележащие эффузивные породы, что не всегда очевидно прослеживается только по параметру ρ .

Показатель сопротивлений ЭМЗ-ВП позволяет выявлять границы различных пород, однако менее пригоден для структурного картирования, поскольку ослабленные зоны, связанные с разломной тектоникой, отражаются в виде субвертикальных цилиндров. Это связано с повсеместным распространением на территории тектонических нарушений и особенностью подбора в рамках одномерной модели. Так, для профиля № 1 отчетливо прослеживается пересечение Мало-Тулукуевской разломной зоны с разломной зоной северо-западного простирания, к которым приурочен ряд рудных тел, отмеченных предшественниками.

Данные МПП, которые нам предоставили сотрудники ФГУП «Урангео», также были обработаны в программе Mars 1D. Отстроенные разрезы по удельному электрическому сопротивлению и поляризуемости при сопоставлении позволяют сказать, что разрезы ЭМЗ-ВП обладают более высокой детальностью и высокой разрешающей способностью, а также выделением локальных высокополяризуемых объектов (рис. 3). Связано это с тем, что подбор кривых МПП, осуществленный в программе Mars 1D, без параметра поляризуемости был невозможен. МПП надежно обеспечивает структурное картографирование вещественных комплексов, различных по проводимости, однако тектонически ослабленные зоны, с которыми связано оруденение, в показателях изменчивости УЭС практически не проявляются.

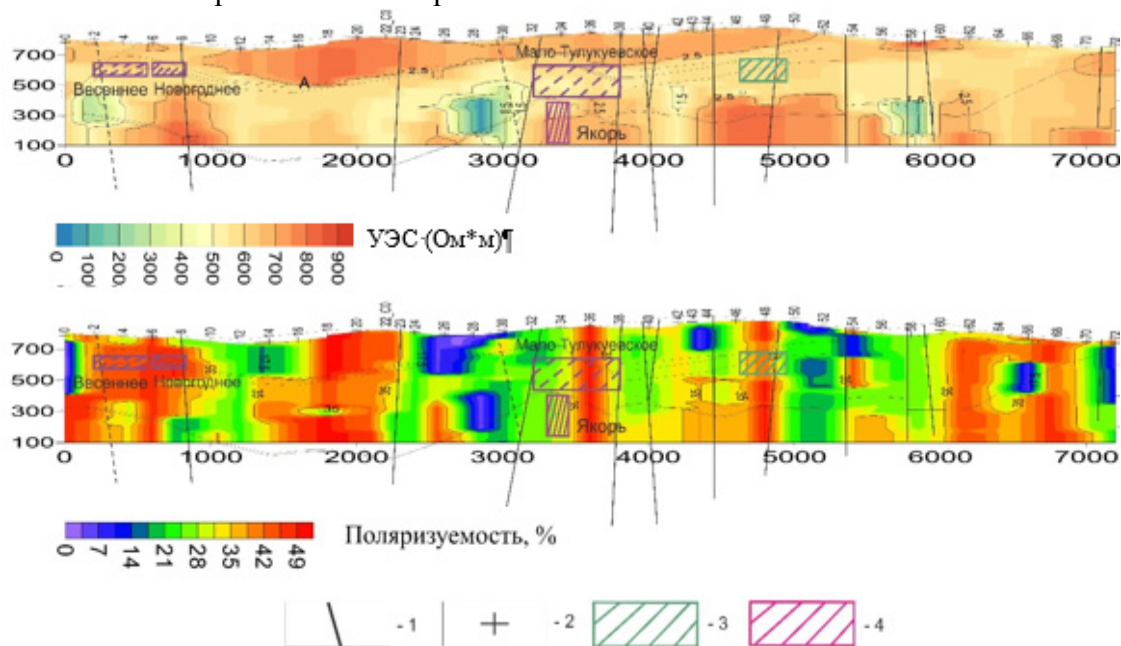


Рис. 13. Разрезы по результатам обработки ЗМПП по профилю 1:

1 – тектонические разломы; 2 – пикеты; 3 – рудная залежь; 4 – урановая рудная залежь

На следующем шаге к данным была применена адаптивно направленная фильтрация и разложение на независимые компоненты. Фильтрация проводилась под углами: $20-88^\circ$ и $92-160^\circ$, это позволило выделить зоны тектонических нарушений. На рис. 4 проиллюстрировано сопоставление выделенной разломной тектоники с реальной тектоникой, выделенной по линии первого профиля.

Профиль 1

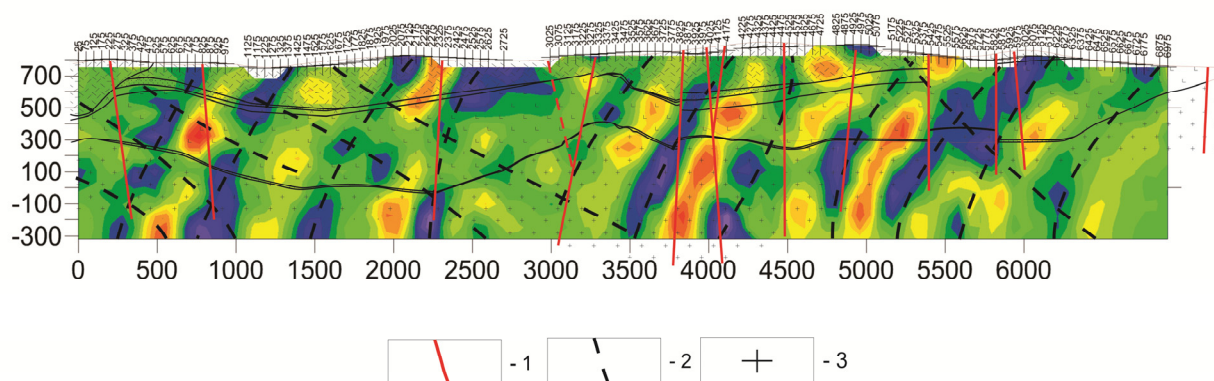


Рис. 14. Результат фильтрации и разложения на независимые компоненты по профилю 1:
1 – тектонические разломы; 2 – разломные зоны, выделенные по результатам направленной фильтрации;
3 – пикеты

Помимо прочего, для первого профиля было проведено трехмерное моделирование нестационарных электромагнитных полей в программном комплексе ИТЕМ-IP [8]. Это позволило подтвердить эффективность технологии импульсной электроразведки с заземленной линией. При сопоставлении результатов моделирования с данными зондирования стало очевидно, что ураново-рудные месторождения «Весеннее» и «Новогоднее» выделяются на глубине порядка 80–100 м, это соответствует реальному положению объектов. На рис. 5 фиолетовыми прямоугольниками отмечено реальное положение месторождений.

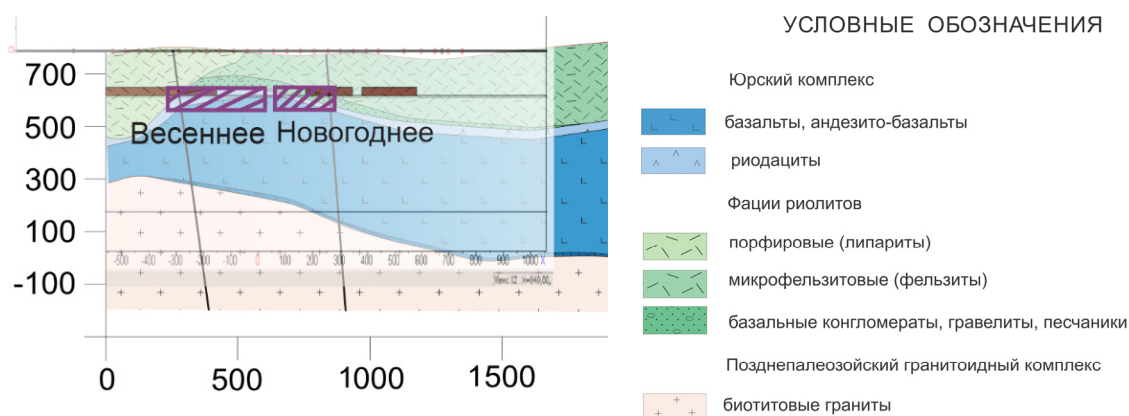


Рис. 15. Сопоставление результатов трехмерного моделирования с геологическим разрезом

На данном материале иллюстрируется высокая эффективность применения технологии ЭМЗ-ВП при поиске полиметаллических и урановых руд. Необходимо провести комплекс лабораторных исследований керны для обоснования связи поляризационных характеристик с урановым оруденением.

Библиографический список

1. Давыденко А. Ю., Грайвер А. В. Анализ главных компонент для фильтрации и сглаживания геофизических данных // Ж. прикл. хим. геофиз. – 2014. – № 109. – С. 266–280.
2. Давыденко Ю. А. Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока // Четырнадцатая Уральская молодежная научная школа по геофизике : сб. науч. материалов, Пермь, 18–22 марта 2013 г. – Пермь : ГИ УрО РАН, 2013. – С. 74–83.
3. Ищукова Л. П. Геология Урулунгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. – М. : Иркутск : пос. Октябрьский, 1995–1996. – 382 с.
4. Хампель Ф. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния / Ф. Хампель, Э. Рончетти, П. Пауссеу, В. Штаэль. – М. : Мир, 1989. – 512 с.
5. Cole K. S. Dispersion and absorption in dielectrics / K. S. Cole, R. H. Cole // J. Chem. Phys. – 1941. – Vol. 6. – P. 341–353.
6. Крылов С. С. Геоэлектрика: поля искусственных источников : учеб. пособие / С. С. Крылов. – СПб. : Изд-во С.-Петербургского университета, 2004. – 138 с.
7. Kozhevnikov N. O. Inversion of TEM data affected by fast-decaying induced polarization: Numerical simulation experiment with homogeneous half-space / N. O. Kozhevnikov, Yu. E. Antonov // Journal of Applied Geophysics. – 2008. – Vol. 66. – P. 31–43.
8. Соловейчик Ю. Г. Конечноэлементное моделирование электрического и магнитного полей вызванной поляризации в трехмерной среде / Ю. Г. Соловейчик, М. Г. Персова, М. В. Абрамов, М. Г. Токарева // Сиб. журн. индустр. мат. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 112–124.



УДК 550.379

О. Ингеров^{^1}, Е. Ю. Ермолин^{^2}

О ВЫБОРЕ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ 5-КОМПОНЕНТНЫХ АМТЗ ПРИ ПОИСКАХ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Аннотация. В магнитотеллурическом (МТЗ) и магнитовариационном (МВП) методах используется естественное переменное электромагнитное поле Земли. Благодаря этому мощному источнику и его глобальному распределению в наблюдаемом отклике проявляются удаленные геоэлектрические неоднородности (расположенные за пределами сети наблюдений). В данной работе на основании 3D-моделирования показано, что сеть 5-компонентных наблюдений АМТ-МВП может быть разряжена в 4–8 раз. Это можно сделать за счет чувствительности метода МВП к наличию объектов, расположенных в стороне от точек наблюдений. По редкой сети наблюдений можно уверенно наметить положение оси аномального объекта, используя карты индукционных векторов. По любой кривой амплитуды типпера на площади исследований можно оценить соотношение горизонтальных размеров (L/a) и проводимость сечения (G) простых 3D-аномальных объектов. После этого следует рекомендовать положение детализационных профилей, для того чтобы более точно определить основные параметры поискового объекта. В качестве практического примера приведены результаты АМТ-МВП в провинции Квебек (Канада). Приведенный практический пример показывает, что по данным МВП можно обнаружить рудное тело, находящееся в нескольких километрах от сети наблюдений.

Ключевые слова: магнитотеллурика, типпер, оптимизация сети наблюдений.

Об авторах:

^{^1} Phoenix-Geophysics LTD, Торонто, Канада.

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

O. Ingerov, E. Yu. Ermolin

ON THE CHOICE OF THE OBSERVATION NETWORKS OF 5 COMPONENT AMT IN THE SEARCH FOR SULPHIDE ORES

Abstract. *Magnetotelluric (MTS) and magnetic-variation (MVP) methods use natural alternating electromagnetic field of the Earth. Thanks to this powerful source and its global distribution in the observed response remote geoelectric heterogeneities (located outside the network of observations) are manifested. In this paper, it is shown on the base of the 3D simulation that the 5 component observations network AMT-MVP can be discharged 4–8 times. This can be done due to the sensitivity of the MVP method to the presence of objects located away from points of observation. By a sparse network of observations, one can mark the position of the axis of the anomalous object, using maps of the induction vectors. For any curve of the amplitude of the tipper on the area of research, one can estimate the ratio of the horizontal sizes (L/a) and cross-section conductivity (G) of simple 3D anomalous objects. After this, a position of detalization profiles should be recommended, in order to determine the main parameters of the search object more accurately. As a practical example, the results of AMT-MVP in the province of Quebec (Canada) are presented. The practical example shows that MVP data helps to detect the ore body, located several miles away from the observational network.*

Keywords: *magnetotellurics, tipper, optimization of observing networks.*

Введение

В магнитотеллурическом (МТЗ) и магнитовариационном (МВП) методах используется естественное переменное электромагнитное поле Земли [1]. Благодаря этому мощному источнику и его глобальному распределению, в наблюдаемом отклике проявляются удаленные геоэлектрические неоднородности (расположенные за пределами сети наблюдений). В 70–80-х годах прошлого века это явление получило название «индукционного эффекта». Он рассматривался как искажающий, вносящий ошибки в однозначную интерпретацию полевых данных МТЗ. В свою очередь, это индукционное влияние может быть использовано в методе MVP [7] для обнаружения аномалий, расположенных в стороне от пунктов наблюдений. В работах [2, 6] были рассмотрены методы экспресс-интерпретации данных МВП при оценке параметров различных типов 2D аномальных объектов. В работе [3] демонстрируется, что методы оценки параметров 2D-объектов можно применять для оценки 3D простых объектов, внося поправки. В работе [4] показано, что по одному удаленному пикету МТЗ-МВП можно оценить параметры 2D-объекта с изометрическим сечением, расположенного в стороне от точки наблюдений.

В связи с существенным увеличением применения аудиомангнитотеллурического (АМТ) метода для поисков рудных объектов встает вопрос об оптимизации методики полевых работ. Здесь существенным резервом сокращения затрат (сокращения сети наблюдений) является использование эффекта удаленной чувствительности метода MVP. Идеи о потенциальной возможности сокращения плотности поисковой сети при выполнении 5-канальных магнитотеллурических измерений высказывались в работе [5]. В данной работе на основании 3D-моделирования показано, что для локализации аномальных рудных объектов можно использовать редкую сеть магнитотеллурических наблюдений (расстояние между профилями в 4–6 раз больше ширины объекта в плане). Основную роль в локализации рудных объектов играют функции отклика метода МВП (индукционные векторы, амплитуда и фаза типпера). По ним легко определить положение детализационных профилей, а затем более детально определить параметры поиско-

вого объекта. В качестве практического примера приведены результаты АМТ-MVP в провинции Квебек (Канада).

1. Параметры моделирования

В качестве поискового объекта было выбрано 3D-тело с квадратным в вертикальной плоскости XZ -сечением. Сторона квадратного сечения (a) равна 200 м (сечение тела – 200×200 м). Длина тела в направлении оси Y (L) равна 1600 м. Таким образом, соотношение $L/a = 8$. Центр объекта расположен на глубине 600 м. В случае массивных руд данный объект представляет несомненный практический интерес даже при такой глубине залегания. Удельное электрическое сопротивление вмещающей среды принято равным $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а удельное сопротивление аномального тела $4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Сверху слой мощностью 25 м и сопротивлением $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ имитирует кору выветривания. Расчеты 3D-отклика АМТ-MВП были выполнены в программном комплексе WinGLink для сети пикетов 50×50 м. Геометрический центр тела имеет координаты: $X = 0$, $Y = 0$, $Z = -600$ м. Ось Y направлена на север. В этом же направлении рассчитаны кривые АМТ XY .

2. Результаты моделирования

На рис. 1 показаны карты параметров АМТ-MВП на периоде 0,008 с (125 Гц), т. к. на данном периоде все отклики имеют наибольший аномальный отклик. На картах в виде дополнительных изолиний показаны значения при построении карты лишь по двум парным профилям ($X - 600$, $X - 400$, $X 400$ и $X 600$). На карте магнитуды типпера (рис. 1, а) с двух сторон тела наблюдаются симметричные положительные аномалии, вытянутые параллельно оси тела. Над самим телом наблюдается узкий минимум. Однако, если принимать в расчет только точки четырех вышеназванных профилей, то мы будем иметь одну широкую положительную аномалию (дополнительные изолинии), которая позволяет идентифицировать наличие аномалии и грубо оценить ее местоположение в плане. Наилучшим образом положение тела в плане определяется по карте индукционных векторов (рис. 1, б) в конвенции Паркинсона (направлены на проводник). Векторы однозначно указывают на позицию тела и позволяют достаточно надежно выбрать положение детализационного профиля, направленного в крест простирания тела и примерно проходящего через его центр (профиль $Y 0$).

Аномалии от рудного объекта на картах параметров АМТ очень слабые (рис. 1, с–ж). Тело проявляется только в компоненте XY , параллельной простиранию тела. Хотя фаза импеданса XY имеет аномалию 3–4 градуса, но эта аномалия является локальной (только над центром рудного тела) и имеет ширину 300 м, что требует поисковых работ с шагом между профилями не менее 300 м, в то время как параметры МВП позволяют уверенно показать наличие объекта, используя шаг между профилями 800–1200 м, что обеспечивает 3- или даже 4-кратное сокращение объемов реконгносцировочных работ. Кроме того, как будет показано ниже, по кривым типпера, измеренным в стороне, можно оценить некоторые устойчивые параметры рудного объекта.

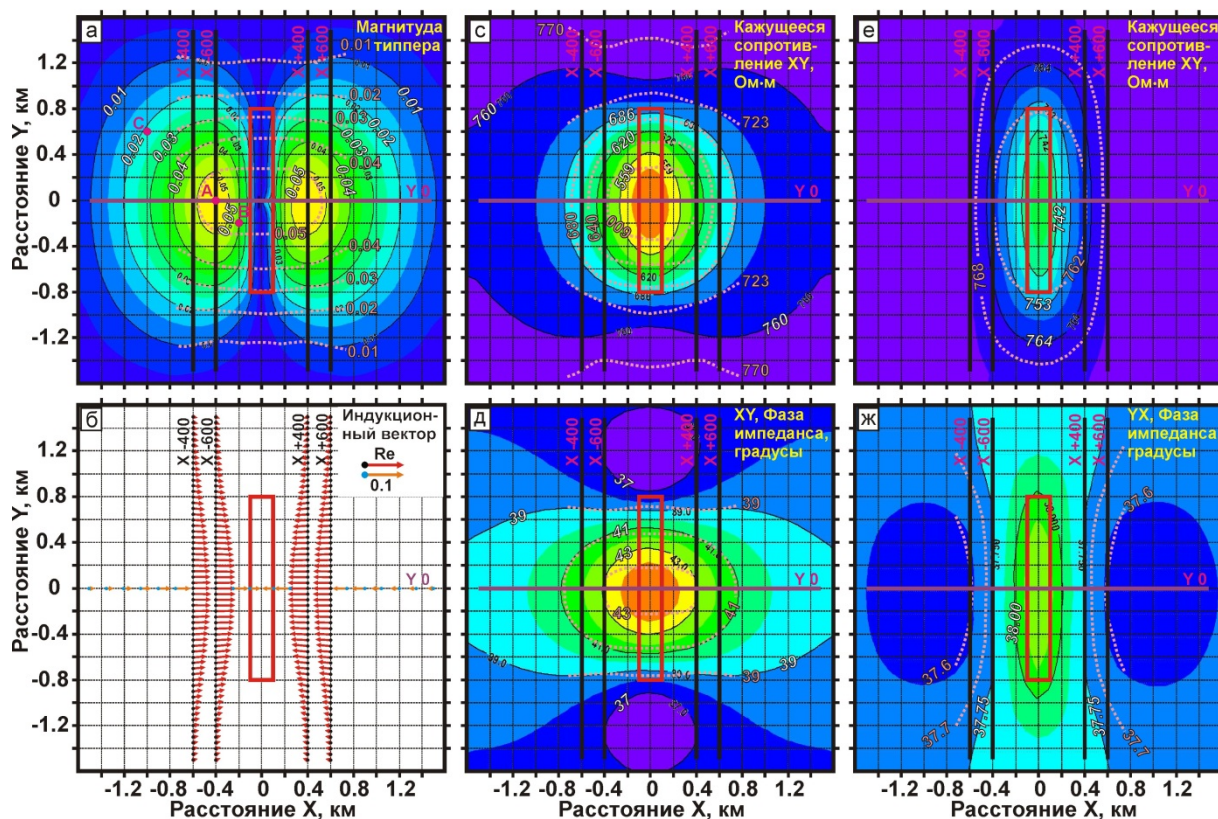


Рис. 16. Карты параметров АМТ-МВП на частоте 0,008 с (125 Гц):

а – магнитуда типпера; б – индукционные векторы в конвенции Паркинсона (на проводник); кажущееся сопротивление (с, е) и фаза импеданса (д, ж) в направлении XY (с, д) и YX (е, ж)

На рис. 2 показаны кривые модуля типпера в различных частях площади: над центром аномалии (кривая А), в 200 м от оси аномального тела (кривая В) и на удалении 1000 м от оси аномального тела (кривая С). В первую очередь следует отметить, что значение периода максимальной магнитуды типпера на всех пикетах остается одинаковым для всех кривых, что позволяет оценить проводимость сечения объекта $G = (\text{площадь сечения})/(\text{относительное удельное сопротивление})$. В работе [6] было показано, что для 2D-объектов $G = \text{Textr} \cdot 2 \cdot 10^5$. Используя данную зависимость для кривой типпера А (рис. 2), мы получим $G = 1300 \text{ См} \cdot \text{м}$. В работе [3] было рассмотрено простое 3D-тело с различным соотношением длины (L) и размеров сечения (a). Для 3D-объекта, представленного в работе [3] при соотношении $L/a = 8$, значение Te занижается в 8–10 раз. При увеличении $G = 1300$ в 8–10 раз (коррекцию за L/a), полученная величина будет близка к истинному значению G нашей исследуемой модели ($G = 200 \text{ м} \cdot 200 \text{ м} / 4 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10\,000 \text{ См} \cdot \text{м}$). В работе [3] было показано, что по соотношению экстремального периода Te и $Th5$ $Tl5$ изолиний 0,5 от максимального значения на разрезах типпера можно оценить соотношение (L/a). Был предложен параметр P , отражающий L/a . $P = (Te/Th5)/(Tl5/Te)$, что эквивалентно $P = (Te)^2/(Th5 \cdot Tl5)$. При расчете по этой простой формуле параметра P для кривой А было получено значение 0,37, что характерно для объекта со значением L/a , равным от 6 до 10. Данный интервал удовлетворяет нашей исследуемой модели ($L/a = 8$). Подобные значения P были получены при анализе кривых В и С и с другими кривыми на площади.

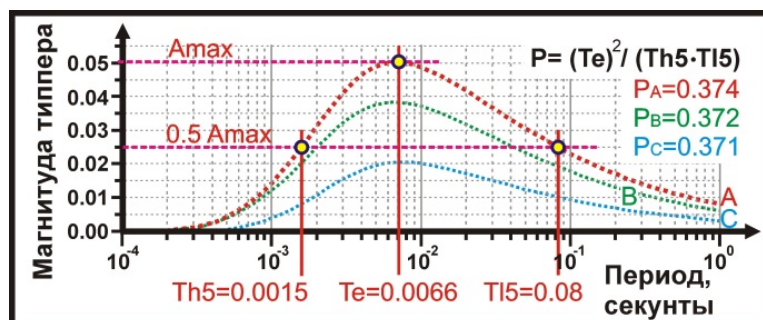


Рис. 17. Кривые типпера в точках А, В и С (положение точек обозначено на рис. 1, а)

Для выбора положения детализационного профиля можно проанализировать псевдоразрезы амплитуды и фазы типпера. На вертикальном разрезе амплитуды типпера по профилю $X+600$ (рис. 3, а1) наблюдается вытянутая в горизонтальном направлении положительная аномалия. Форма амплитудной аномалии (рис. 3, а1) и отсутствие на вертикальном разрезе фазы типпера вертикальных границ смены знака фазы (рис. 3, а2) могут служить однозначным индикатором того факта, что аномальное тело находится в стороне от профиля. Карты индукционных векторов следует строить на частоте максимума магнитуды типпера. В параметрах АМТ объект проявляется слабо, но самое главное – сложно по параметрам АМТ ответить на вопрос, находится объект под профилем или профиль не пересекает аномальное тело. Очевидно, что детализационный профиль следует проводить через центр аномалии типпера. Отклик АМТ-МВП на детализационном профиле (профиль $Y 0$) представлен на рис. 3, б1–б3. Рудное тело хорошо проявляется как в компоненте XU (параллельной простиранию тела) АМТ (рис. 3, б3), так и в отклике МВП. По разрезу фазы типпера (рис. 3, 2) можно очень точно определить положение центра аномального объекта по наличию вертикальной градиентной зоны. По расстоянию между двумя экстремумами на разрезе магнитуды типпера можно определить глубину залегания центра аномального тела $0,42 \cdot D$ [6]. Если ввести поправку за соотношение L/a [3], глубина будет близка к 600 м.

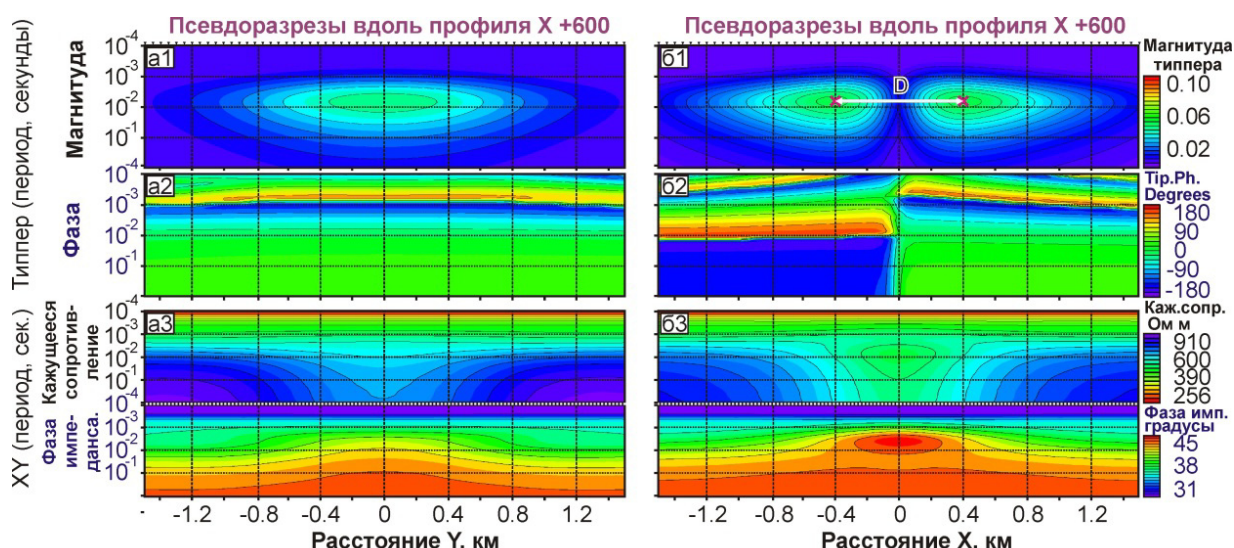


Рис. 18. Псевдоразрезы вдоль профилей $Y+600$ (а1–а3) и $X 0$ (б1–б3). Амплитуда (а1, б1) и фаза (а2, б2) типпера, кажущееся сопротивление и фаза импеданса в направлении XU (а3, б3)

3. Локализации рудного объекта в провинции Квебек (Канада) по данным АМТ-МВП

Работы методом АМТ-MVP в 5-канальном варианте были выполнены на перспективном участке в центральной части провинции Квебек. Использовалась аппаратура

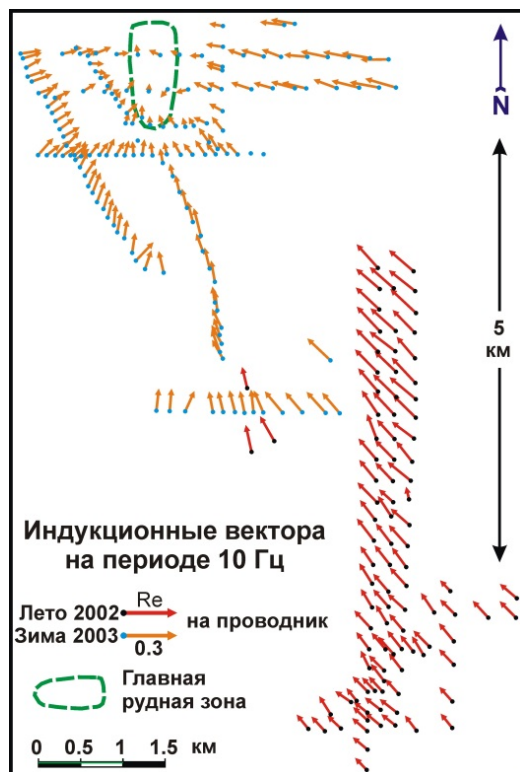


Рис. 19. Исследования АМТ-МВП на канадском щите

MTU-5A, магнитные датчики АМТС-30 устанавливались на специальных треногах. В летний период 2002 г. по настоянию заказчика было пройдено три профиля меридионального простирания (черные точки на рис. 4); в пределах профилей не было обнаружено существенных аномальных объектов, представляющих поисковый интерес. Однако реальные индукционные векторы на частоте 10 Гц уверенно указывали на проводящий объект в северо-западной части изучаемой площади. Из-за озера и болота детализацию в летний период выполнить не удалось. В зимний период 2003 г. была выполнена детализация методом МВП, не требующим заземлений (синие пикеты на рис. 4). Трехкомпонентные измерения выполнялись той же аппаратурой. Диагональные профили северо-восточного простирания постепенно наращивались от существующей сети по льду замерзшего озера. В конечном итоге это позволило локализовать искомое тело и выбрать положение двух широтных детализационных профилей (АМТ+МВП). В результате найден объект, расположенный на удалении более 3–5 км от сети первоначальной съемки.

Выводы

При использовании 5-компонентных измерений АМТ-МВП можно разрядить расстояния между профилями исследования в 3–4 раза за счет чувствительности метода МВП к наличию объектов, расположенных в стороне от точек наблюдений. По кривым амплитуды типпера на площади исследований можно оценить соотношение горизонтальных размеров (L/a) и проводимость сечения (G) аномального объекта. По редкой сети наблюдений можно уверенно наметить положение оси аномального объекта, используя карты индукционных векторов. Это позволяет наметить оптимальное положение детализационного профиля АМТ-МВП, позволяющего определить основные параметры тела. Приведенный практический пример показывает, что по данным МВП можно обнаружить рудное тело, находящееся в нескольких км от сети наблюдений. Преимущества методики АМТ-МВП проявляются как в геологической эффективности, так и в производительности и себестоимости полевых работ при поисках сплошных рудных объектов.

Библиографический список

1. Berdichevsky M. N., Dmitriev V. I. Models and methods of magnetotellurics. – Berlin : Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. – 563 p.

2. Ermolin E., Ingerov O., Ingerov I. Mapping of vertical conductivity bodies by MVP // All-Russian school-workshop dedicated to M. N. Berdichevsky and L. L. Vaniyan of electromagnetic researches of the Earth. – Saint-Petersburg, 2011. – P. 245–249.
3. Ermolin E., Ingerov O., Ingerov I. Evaluation of conductive 3-D ore bodies parameters using tipper frequency response // 76th EAGE Conference and Exhibition, June 16–19, 2014. – P. 4746–4751.
4. Ermolin E., Ingerov O., Fox L. MTS and MVP data interpretation to estimate the 2D anomaly bodies parameters situated away from measuring profile // 22nd EM Induction Workshop, Weimar, Germany, Aug. 24–30, 2014.
5. Ingerov O. Non-grounded surface electroprospecting technique / O. Ingerov, L. Fox, A. Golyashov, A. Colin, I. Ingerov // Proceedings of 71st EAGE Conference and Exhibition, Amsterdam, Netherlands, June 8–11, 2009.
6. Ingerov O., Ermolin E. The parameter estimation of 2-D conductive isometric bodies by singular points at the tipper frequency characteristic // Proceedings of 20th Induction Workshop IAGA, Giza, Egypt, September 18–24, 2010. – P. 303–306.
7. Rokityansky I. I. Geoelectromagnetic investigation of the Earth crust and mantle. – Berlin : Heidelberg : New York : Springer-Verlag, 1982. – 378 p.



УДК 551.241

Ю. В. Колмаков^{^1}, Е. В. Потехина^{^2}, А. Ю. Колмаков^{^3}

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ ТОНОДСКОГО И БОДАЙБИНСКОГО РАЙОНОВ (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ, РОССИЯ)

Аннотация. Приводятся характеристики геодинамических обстановок Бодайбинского и Тонодского золоторудных районов и результаты их сравнительного анализа. Делается вывод о существенном различии в этих районах гипотетических источников благородных металлов и процессов их мобилизации и концентрирования.

Ключевые слова: геодинамическая обстановка, золотое оруденение, Патомское нагорье.

Об авторах:

^{^1} К. г.-м. н., доцент, Томский политехнический университет, Томск, kolmakovyv@tpu.ru.

^{^2} Зам. нач. отдела ЦБД, Томский филиал ФБУ «ТФГИ по СФО», Томск, potekhina@sibmail.com.

^{^3} Старший лаборант, Томский государственный университет, Томск, antokolmakov@mail.ru.

Y. V. Kolmakov, E. V. Potekhina, A. Y. Kolmakov

GEODYNAMIC CONDITIONS OF TONOD AND BODAIBO AREA GOLD ORE OCCURRENCE (PATOM UPLAND, RUSSIA)

Abstract. Geodynamic characteristics and the results of comparative analysis of Bodaibo and Tonod gold-ore areas are provided. It is concluded that differences in hypothetical sources of precious metals in these areas and processes of their mobilization and concentration are substantial.

Keywords: geodynamic conditions, gold ore occurrence, Patom upland.

Введение

В проблеме металлоносных черных сланцев, ранее рассматриваемых исключительно как водно-осадочные образования [1], получил мощное развитие сравнительно новый аспект, связанный с накоплением многочисленных фактов обнаружения углеродных метасоматитов с повышенными содержаниями Au и ЭПГ в зонах разрывных нарушений среди пород различного состава и происхождения [2–7]. Рудогенерирующие системы типа Бодайбинской, включающие водно-осадочную стадию образования черных сланцев, достаточно прочно утвердились в теории рудогенеза и характеризуются всесторонней геологической, геодинамической, геохимической и геофизической изученностью. Значительно слабее, особенно в геофизическом отношении, изучены рудогенерирующие системы с углеродными метасоматитами. По имеющимся фактам и признакам золотую минерализацию Тонодского района можно считать производной таких рудогенерирующих систем, в которых углеродная минерализация является метасоматической, а не органогенной или гидротермально-осадочной. На его примере готовится серия работ по геофизической и петрофизической характеристике золотого оруденения на разном уровне его организации согласно металлогенической иерархии: от рудного узла до рудного тела.

Предваряется серия этих работ данной статьей о результатах сравнительного анализа специфичности геодинамических обстановок двух соседствующих золоторудных районов: Тонодского и Бодайбинского. Сопоставление этих двух районов приводится по ряду причин. Их непосредственное соседство дает основание предполагать участие одних и тех же геодинамических событий, или некоторых из них, в истории развития обоих районов. Кроме того, Бодайбинский район, благодаря входящему в его состав гигантскому месторождению Сухой Лог, значительно лучше изучен в отношении ключевых проблем, касающихся зарождения и эволюции этой металлогенической структуры, источников благородных металлов и процессов их мобилизации. Поэтому подробное рассмотрение геодинамического развития Бодайбинского золоторудного района позволит глубже понять условия рудогенеза в Тонодском районе.

1. Геодинамические события в истории формирования рудных районов

В Байкальской складчатой области четыре краевых выступа раннедокембрийского фундамента платформы объединяют в Чуйско-Нечерский антиклинорий. Тонодский – занимает центральное положение среди этих выступов. Разделяемые антиклинорием Байкало-Патомский и Мамско-Бодайбинский синклинии в современной структуре региона представляют фрагменты внешней, палеошельфовой (миогеосинклинальной), мегазоны рифейского этапа развития складчатой области. Внутренняя, эвгеосинклинальная, мегазона включает Байкало- и Баргузино-Витимскую зоны [8].

Нижний протерозой. В составе Тонодского выступа терригенно-осадочный комплекс включает флишеидные отложения албазинской и михайловской свит, накопление которых происходило в условиях континентального склона. На этапе раннепротерозойской складчатости происходило заложение высокопроницаемых складчато-разломных зон интенсивного дробления и внутри- и межслоевого рассланцевания (Баженов, 1981 ф).

Протоорогенные образования представлены кевактинским гранитоидным массивом чуйско-кодарского комплекса с возрастом 1900 ± 50 млн лет; на рубеже 1750 ± 50 млн лет раннепротерозойский цикл завершился тектоно-магматической активизацией с формированием гранитоидов амандракского комплекса [9]. После раннепротерозойского орогенеза и активизации наступила стабилизация тектонического режима, сопровождавшаяся корообразованием.

Ранний – средний рифей. В раннем рифее на месте будущей миогеосинклинальной мегазоны началось формирование прогибов, которые наполнялись осадками пурпольской свиты в виде переотложенных продуктов кор выветривания. С пурпольским временем связывают начало заложения шельфового морского бассейна. Последующее развитие мегазоны происходит под влиянием становления и функционирования Олоkit-Бодайбинского палеорифта [10], в котором северный Бодайбинский сегмент образует систему радиально расходящихся рифтингов [8].

Начало рифтогенного этапа выражается в деструкции эпикарельского фундамента, образовании систем грабен и накоплении в них осадков медвежьей свиты с повышенной сингенетичной железистостью. Состав свиты преимущественно конгломератовый с участием вулканогенных образований. На завершающей стадии рифтогенного этапа активизировалась магматическая деятельность. Индикаторами этого события являются метабазиты чайского комплекса, слагающие малые интрузии в боковых ветвях Бодайбинской системы рифтингов в составе краевых выступов фундамента. Центральная ветвь погребена под осадочным комплексом Бодайбинского прогиба [11]. В работе [12] повышенную плотность нижней коры под Бодайбинским синклинием объясняют вхождением в ее состав фрагментов офиолитовых комплексов ранне-среднерифейского возраста, рассматривая их в качестве главных поставщиков золота и ЭПГ.

В среднем рифее осадконакопление во внешней зоне происходило в условиях пассивной окраины Сибирского континента на границе с Палеоазиатским океаном.

Верхний рифей – начало венда. В конце среднего рифея в соседней Байкало-Витимской зоне произошло заложение рифтингов; для нее настал этап активного развития магматизма. На протяжении верхнего рифея и начала венда здесь проявилась серия комплексов базит-ультрабазитового [8].

Интенсификация рифтингового магматизма в Байкало-Витимской эвгеосинклинальной области, вероятно, привела к подновлению разновозрастных систем нарушений в смежной миогеосинклинальной мегазоне и общей активизации Олоkit-Бодайбинского палеорифта. Магматическими индикаторами активизации являются лерцолиты доросского комплекса с возрастом 1055 ± 69 млн лет, плагиограниты язовского комплекса – 730 ± 97 млн лет (их возраст приводится в работе [11] со ссылкой на геохронологические исследования А. Л. Неймарка и А. М. Ларина), а также габброиды и гипербазиты довыренского комплекса – 700 ± 20 млн лет [13]. Лерцолиты проявлены в Нечерском выступе дорифейского фундамента, плагиограниты – в форме даек и малых интрузий в пределах всего Чуйско-Нечерского антиклинория, образования довыренского комплекса развиты в Олоkitской зоне. Породы доросского и довыренского комплексов характеризуются повышенными содержаниями золота и ЭПГ [14]. Формирование гранитов язовского комплекса происходило, предположительно, в условиях кратковременной смены тектонического режима. В пределах длительного среднерифейско-вендского этапа растяжения в верхнем рифее на короткое время устанавливается режим сжатия, диагностируемый по широкому проявлению в это время взбросовых и взбросо-сдвиговых структур на уровне фундамента. Их принадлежность к этому времени устанавливается по приуроченности к ним интрузий гранитов язовского комплекса [11].

Эндогенная активизация миогеосинклинальной мегазоны в верхнем рифее – нижнем венде выразилась также в металлогенической специализации осадков, накапливающихся в условиях эксгальационной деятельности [10, 15]. Последняя осуществлялась в условиях рассеянного спрединга дна седиментационного бассейна и циркуляции морских вод по конседиментационным глубинным разломам [16].

В Олоkitской зоне широко проявлена свинцово-цинковая первично-осадочная минерализация с изотопным возрастом 740–760 млн лет [17]. В Бодайбинском прогибе толщи рассматриваемого интервала осадконакопления включают большое количество углеродистых пород, отличающихся повышенным содержанием золота и ЭПГ [18], и вмещают большинство известных здесь благороднометалльных месторождений, в том числе и уникальное – Сухой Лог.

На уровне раннедокембрийского фундамента и основания рифейского разреза на рассматриваемом этапе развиваются разнообразные полихронные метасоматиты и связанные с ними месторождения золота [19]. На месте Тонодского выступа (тогда еще не существующего как выступ) были активны рифейские конседиментационные разломы: Тонодский и Хайвергино-Кевактинский [11]. Рудогенные процессы проявились в интенсивно тектонизированном блоке на пересечении северо-восточных Тонодского и Хайвергино-Кевактинского разломов с нижнепротерозойскими субмеридиональными складчато-разломными зонами дробления и расщепления (Верхозин, 2007 ф). Примером такого оруденения является месторождение Чертово Корято Кевактинского рудного узла, размещающееся в нижнепротерозойских метаосадочных породах михайловской свиты. Возраст оруденения оценивался методом изотопного анализа свинца сульфидов (галенит, арсенопирит, пирит), входящих в состав рудной минерализации. Значения модельного Pb-Pb-возраста для свинца месторождения приходятся на интервал 1050–720 млн лет [20]. Контролирующий месторождение северо-восточный разлом пересекает весь Кевактинский рудный узел и нижнепротерозойские гранитоиды Амандракского массива. В зоне влияния разлома выявлено значительное омоложение гранитов до 940 ± 30 и 800 ± 30 млн лет, свидетельствующее о существенной регенерации пород массива на рифейском этапе развития [9].

Венд – ранний палеозой. В середине венда произошла инверсия тектонического режима: растяжение сменилось сжатием в связи с началом этапа формирования конвергентных границ в пределах Палеоазиатского океана. Байкало-Витимская зона была вовлечена в процессы субдукции [21]. В итоге на юге бассейна седиментации возник ороген, денудация которого привела к перекрытию специализированных углеродсодержащих отложений молассоидными осадками мощностью 2,5–4 км.

Инициированные коллизионными процессами на юге региона тектонические напряжения передавались удаленным к северу толщам Бодайбинского прогиба. Под действием этих напряжений и по мере их нарастания металлоносные породы позднерифейских свит испытывали сначала слабые преобразования на уровне катагенеза, низкотемпературного метаморфизма и далее линейное складкообразование и складчатый метаморфизм [16, 19]. В работе [22] возраст катагенеза оценивается древнее, чем середина венда, в 650–630 млн лет, низкотемпературного метаморфизма – в 570 млн лет.

Образование Чуйского, Тонодского и Нечерского выступов нижнепротерозойского фундамента было сопряжено по времени с линейным складкообразованием рифейско-вендских отложений в эпоху каледонской коллизии. Общее тангенциальное сжатие складчатой области привело к активизации древних нарушений фундамента и формированию в северной части складчатой области серии субпараллельных дугообразных разломов, падающих навстречу друг другу. По ним реализовывался механизм горизонтального сокращения пространства в фундаменте путем выдавливания антиклинорных блоков вверх на различную высоту. В результате территория, развивающаяся в рифее – венде в условиях пассивной континентальной окраины, в раннем палеозое была разделена Чуйско-Нечерским поднятием на два синклинория – Байкало-Патомский и Мамско-Бодайбинский.

Средний – поздний палеозой. Дальнейшее развитие региона происходило в условиях активизации Забайкальского плюма. Его магматическими индикаторами в Байка-

ло-Витимской зоне выступают интрузии щелочно-габбровой формации итакитского комплекса с возрастом 457 ± 33 и 463 ± 20 млн лет [8].

В Бодайбинском прогибе в ареале воздействия плюма проявлены углеродистые метасоматиты с сульфидами, березиты и листвиниты [8]. В работе [22] возраст кварц-карбонат-серицитовых метасоматитов на месторождении Сухой Лог оценивается около 450–440 млн лет, а процесс их формирования рассматривается как главный рудный этап в распределении и концентрировании золота. Другими авторами образование этих же метасоматитов на месторождении расценивается как важный рудоподготовительный этап, а собственно рудный они связывают с герцинской тектоно-магматической активизацией (ТМА), когда рудогенез сопровождался гранитоидным магматизмом и становлением массивов конкудеро-мамаканского комплекса [23].

Имеющиеся геохронологические факты свидетельствуют об отсутствии в Кевактинском золоторудном узле преобразований палеозойского возраста. Вместе с тем имеются данные, подтверждающие, что палеозойские события и связанные с ними рудогенные процессы получили развитие в Чуйско-Нечерском антиклинории в целом, и в частности – в Тонодском выступе. Так, в Аkitканском и Нечерском поднятиях антиклинория возраст переработки первичной раннепротерозойской урановой минерализации и окончательного формирования урановых руд составляет 377–385 млн лет [24].

Породы Тонодского выступа местами подверглись преобразованиям палеозойского метаморфизма, вызванного поступлением мантийных гранитизирующих флюидов в связи с каледонской активизацией Забайкальского плюма [25, 26]. Распространение метаморфизма контролировалось глубинными разломами и охватило, главным образом, западный блок Тонодского выступа. Эта часть выступа разбита серией секущих северо-восточных разломов. Сдвиговые внутриблоковые перемещения по этим разломам в палеозойское время диагностируются по деформациям в этом же направлении изолиний высот зеркала складчатости. Палеозойский метаморфизм слаботехнологичных железистых отложений медвежьей свиты привел к образованию промышленно значимых магнетит-гематитовых кварцитов в Витимском железорудном районе.

Кевактинский золоторудный узел и большая часть Амандракского массива находятся в составе центрального блока Тонодского выступа. Отсутствие здесь внутриблоковых подвижек в палеозойское время подчеркивается неискаженными изолиниями высот зеркала складчатости, параллельными дугообразным разломам, по которым происходило выдавливание выступа. Внутриблоковая сохранность центральной части Тонодского выступа хорошо согласуется с изотопными датировками на месторождении Чертово Корыто и регенерированной части Амандракского массива, показывающими, что ее эндогенная эволюция завершилась в верхнем рифее.

Очевидно, что продукты палеозойской ТМА, широко распространенные в соседних районах, в том числе и Бодайбинском, в Чуйско-Нечерском антиклинории проявились не повсеместно, а фрагментарно.

2. Результаты сравнительного анализа рудогенерирующих систем Тонодского и Бодайбинского районов

Анализ опубликованных данных по геодинамической эволюции региона от нижнего протерозоя до верхнего палеозоя позволяет сформулировать сходства и различия условий формирования золотого оруденения в Тонодском и Бодайбинском районах.

1. Тонодский и Бодайбинский рудные районы размещаются в разных структурно-формационных зонах.

В Тонодском районе оруденением был охвачен блок земной коры на уровне нижнепротерозойского фундамента платформы. В раннем палеозое в результате коллизи-

онных процессов этот блок вместе с другими блоками фундамента был поднят, и в современной структуре Байкальской складчатой области они составляют Чуйско-Нечерский антиклинорий.

Бодайбинский рудный район приурочен к одноименному прогибу, развитому на краю пассивной континентальной окраины и выполненному среднерифейскими – вендскими отложениями. При этом подавляющее большинство месторождений Бодайбинского района локализуется в сравнительно узком стратиграфическом интервале, отвечающем верхнерифейскому времени накопления.

2. Источники благородных металлов в Бодайбинском и Тонодском районах имеют, вероятно, парагенетическую связь: образование и тех и других является результатом длительного функционирования Олокит-Бодайбинского палеорифта. Но форма и процессы образования источников в этих двух районах отличаются принципиально.

В Бодайбинском районе это рифтогенные высокожелезистые отложения и продукты основного – ультраосновного магматизма, а также предполагаемые породы офиолитового комплекса. Большая роль, как источнику благородных металлов, отводится верхнерифейским – нижневендским гидротермально-осадочным углеродсодержащим отложениям с повышенными содержаниями золота и ЭПГ.

В Тонодском районе распространенность пород повышенной основности значительно ниже, чем в Бодайбинском, а образования офиолитового комплекса и вовсе отсутствуют [12]. Вместо специализированных металлоносных углеродистых осадков здесь распространены разнообразные полихронные метасоматиты, в том числе и углеродные, в зонах влияния дизъюнктивных систем, подновленных и функционирующих в эпоху верхнерифейской активизации Олокит-Бодайбинского палеорифта.

Очевидно, что масштаб распространения источников благородных металлов в Бодайбинском районе носит более глобальный характер, чем в Тонодском. Неодинаковый набор вероятных источников может быть причиной различной металлогенической специализации оруденения Бодайбинского и Тонодского районов: уникальных запасов золота и ЭПГ на комплексном месторождении Сухой Лог и наличия платиноидов только в виде следов [27] на золоторудном месторождении Чертово Кoryто.

3. Мобилизация золота в Бодайбинском районе начинается в условиях катагенеза верхнерифейских углеродсодержащих отложений и последующего регионального и складчатого метаморфизма. Дальнейшее развитие оруденения обязано активизации Забайкальского плюма, инициировавшего рудный этап и этап окончательной регенерации продуктивной минерализации в условиях каледонской и герцинской ТМА. Магматическими процессами, сопровождающими рудогенез, являлись каледонская гранитизация и становление герцинского конкудеро-мамаканского комплекса гранитоидов [26]. На этапе активизации плюма в зону его влияния и связанных с ним мобилизующих термальных растворов попадали уже все гипотетические источники благородных металлов и гидротермально-осадочного, и магматического происхождения.

В Тонодском районе этап рудообразования и локализации золотой минерализации связывают с позднерифейской кратковременной сменой обстановки растяжения обстановкой сжатия. Смена тектонического режима выразилась в проявлении взбросо-сдвиговых нарушений, становлении малых интрузий гранитоидов язовского комплекса и процессах интенсивного гидротермального метасоматизма.

Бодайбинская рудогенерирующая система отличается от Тонодской большим количеством и разнообразием как гипотетических источников, так и процессов мобилизации благородных металлов.

Таким образом, у сравниваемых рудогенерирующих систем, Тонодской и Бодайбинской, по таким ключевым характеристикам, как геодинамическая позиция, источники благородных металлов и механизмы их мобилизации, распределения и концен-

трирования, имеется больше отличий, чем сходства. Поэтому при формировании критериев прогноза разномасштабных продуктов их эволюции, в виде рудных районов, узлов и т. д., к каждой из этих систем нужен индивидуальный подход.

Библиографический список

1. Юдович Я. Э. Геохимия черных сланцев / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Л. : Наука, 1988. – 272 с.
2. Иванкин П. Ф. Формы переноса и условия отложения золота в «черносланцевых» зонах (в связи с задачами поиска и оценки месторождения) / П. Ф. Иванкин, П. В. Иншин, Н. И. Назарова ; под ред. В. А. Нарсеева, А. А. Стороженко // Прогноз, поиски и оценка золоторудных месторождений в «черносланцевых» толщах : труды ЦНИГРИ. – 1984. – Вып. 184. – С. 71–97.
3. Томсон И. Н. Условия образования эндогенных «черных сланцев» в Приморье / И. Н. Томсон, О. П. Полякова, В. П. Полохов, В. А. Нивин // Геология руд. месторождений. – 1993. – Т. 35. – № 4. – С. 344–351.
4. Летников Ф. А. Высокоуглеродистые тектониты – новый тип концентрирования золота и платины / Ф. А. Летников, В. Б. Савельева, Ю. В. Аникина, М. М. Смагунова // ДАН. – 1996. – Т. 347. – № 6. – С. 795–798.
5. Савельева В. Б. Углеродистые тектониты Оспинско-Китойского гипербазитового массива (Восточный Саян) / В. Б. Савельева, Н. Г. Звонкова, Ю. В. Аникина // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 5. – С. 598–610.
6. Сидоров А. А. О золотоносности углеродистых метасоматитов / А. А. Сидоров // ДАН. – 2001. – Т. 378. – № 2. – С. 218–220.
7. Кузьмин М. И. Углеродистое вещество сульфидно-кварцевых жил Курултыкенского полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) / М. И. Кузьмин, Ю. П. Трошин, С. М. Бойко, Э. А. Развозжаева, Л. Д. Зорина, Д. Х. Мартихаева // Геология руд. месторождений. – 2010. – Т. 52. – № 3. – С. 280–288.
8. Митрофанов Г. Л. Тектонические закономерности размещения и формирования месторождений благородных металлов южного обрамления Сибирской платформы : дис. ... д. г.-м. н. в форме научного доклада / Г. Л. Митрофанов. – М., 2006. – 44 с.
9. Макарьев Л. Б. Докембрийские гранитоиды Нечерского и Тонодского поднятий Байкальской складчатой области / Л. Б. Макарьев, А. П. Чухонин, В. В. Черников, А. М. Ковешников, П. Ф. Иванов, М. В. Павлов, Б. В. Яблоновский // Геология и геофизика. – 1992. – № 9. – С. 88–104.
10. Рундквист И. К. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И. К. Рундквист, В. А. Бобров, Т. Н. Смирнова, М. Ю. Смирнов, М. Ю. Данилова, А. А. Ащеулов // Геология руд. месторождений. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
11. Докембрий Патомского нагорья. – М. : Недра, 1995. – 352 с.
12. Булгатов А. Н. Террейны Байкальской горной области и размещение в их пределах месторождений золота / А. Н. Булгатов, И. В. Гордиенко // Геология руд. месторождений. – 1999. – Т. 41. – № 3. – С. 230–240.
13. Neymark L. A. New data on the age of the Akitkan group in the Baikal-Patom foldbelt, from results of U-Pb dating of zircons / L. A. Neymark, A. M. Larin, S. Z. Yakovleva // Doklady Akad. Nauk SSSR. – 1991. – Vol. 320 (1). – P. 182–186.
14. Дистлер В. В. Малосульфидный платиноносный горизонт Йоко-Довыренского расслоенного гипербазит-базитового интрузива / В. В. Дистлер, А. Г. Степин // Докл. РАН. – 1993. – Т. 328. – № 4. – С. 498–501.
15. Буряк В. А. Формирование золотого оруденения в углеродсодержащих толщах / В. А. Буряк // Известия АН СССР. Серия «Геология». – 1987. – № 12. – С. 94–105.
16. Немеров В. К. Условия формирования крупных месторождений суходожского типа в углеродистых отложениях / В. К. Немеров, А. М. Спиридонов, Э. А. Развозжаева // Проблемы геологии и разведки месторождений полезных ископаемых : материалы Всероссийской конференции. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – С. 424–428.
17. Неймарк Л. А. Изотопный состав свинца и генезис свинцово-цинкового оруденения Олоkitской зоны Северного Прибайкалья / Л. А. Неймарк, Е. Ю. Рыцк, Б. М. Гороховский [и др.] // Геология руд. месторождений. – 1991. – № 6. – С. 34–38.
18. Развозжаева Э. А. Благородные металлы и углеродистое вещество в рудах месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь) / Э. А. Развозжаева, В. Ю. Прокофьев, А. М. Спиридонов, Д. Х. Мартихаева, С. И. Прокопчук // Геология руд. месторождений. – 2002. – Т. 44. – № 2. – С. 116–124.
19. Иванов А. И. Рифейско-палеозойское рудообразование в Байкало-Патомской золоторудной провинции / А. И. Иванов // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 12. – С. 3–10.

20. Чугаев А. В. Pb-Pb изотопные характеристики крупных золоторудных месторождений Байкало-Патомского нагорья Сухой Лог и Чертово Корыто по данным высокоточного MC-ICP-MS анализа свинца / А. В. Чугаев, И. В. Чернышов, Ю. Г. Сафонов, М. Р. Сароян, А. В. Еремина // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований : материалы Всероссийской конференции. – М. : ИГЕМ, 2010.

21. Рундквист Д. В. Особенности геологического развития и металлогении байкалит / Д. В. Рундквист // Основные проблемы рудообразования и металлогении. – М. : Наука, 1990. – С. 44–65.

22. Юдовская М. А. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов / М. А. Юдовская, В. В. Дистлер, Н. В. Родионов, А. В. Мохов, А. В. Антонов, С. А. Сергеев // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.

23. Кузьмин М. И. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М. И. Кузьмин, В. В. Ярмолук, А. И. Спиридонов, В. К. Немецков, А. И. Иванов, Г. Л. Митрофанов // Докл. РАН. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.

24. Голубев В. Н. Отложение и мобилизация урана в Северо-Байкальском регионе, по данным анализа U-Pb-изотопных систем урановых руд / В. Н. Голубев, Л. Б. Макарьев, Л. В. Былинская // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50. – № 6. – С. 548–557.

25. Ярмолук В. В. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика / В. В. Ярмолук, В. И. Коваленко, М. И. Кузьмин // Геотектоника. – 2000. – № 5. – С. 3–29.

26. Distler V. V. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia / V. V. Distler, M. A. Yudovskaya, G. L. Mitrofanov [et al.] // Ore Geol. Reviews. – 2004. – Vol. 24/1-2. – P. 7–44.

27. Торикова М. В. Факторы выявления возможных ресурсов рения в месторождениях золота и металлов платиновой группы, связанных с углеродистыми формациями / М. В. Торикова, Ю. А. Кудин, Н. М. Волкова // Редкие металлы: минерально-сырьевая база, освоение, производство, потребление : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – М. : ИМГРЭ, 2011. – С. 162–163.



УДК 550.837+550.361

В. В. Спичак¹, О. К. Захарова¹

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ГЕОТЕРМОМЕТР – ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ РАЗВЕДКИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Аннотация. Представлен краткий обзор принципов работы электромагнитного геотермометра и результатов его применения для решения задач разведки геотермальных ресурсов.

Ключевые слова: электромагнитный геотермометр, геотермальные ресурсы.

Об авторах:

¹ Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, Москва.

V. V. Spichak, O. K. Zakharova

ELECTROMAGNETIC GEOTHERMOMETER AS AN EFFECTIVE GEOTHERMAL RESOURCES PROSPECTING TOOL

Abstract. A brief review of the principles of electromagnetic geothermometer's functioning and the results of its application for solving problems of exploration of geothermal resources is given.

Keywords: electromagnetic geothermometer, geothermal resources.

Введение

Электропроводность и температура, являясь взаимосвязанными прокси-параметрами, могут обеспечить взаимно-дополнительную информацию, которая особенно полезна при изучении геотермальных зон [1, 2]. В работе [3] был предложен принципиально новый подход к оценке пространственного распределения температуры по данным электромагнитных (ЭМ) зондирований (так называемый «косвенный ЭМ-геотермометр»), который особенно эффективен на промежуточных глубинах от забоя скважин до 10 км. В серии работ, обобщенных в монографиях [4, 5], была разработана методология его применения, а также решены важные задачи разведки геотермальных ресурсов. Ниже будут приведены примеры его применения в разных геологических условиях.

1. Принцип работы электромагнитного геотермометра

Общая схема применения электромагнитного геотермометра состоит из следующих шагов:

- измерение данных электромагнитных зондирований (с естественными или контролируемыми источниками поля);
- построение модели удельного сопротивления / электропроводности того участка, где требуется построить модель температуры;
- калибровка ЭМ-геотермометра на геотермах из имеющихся скважин (с помощью обучения нейросети «с учителем» на соответствии значений удельного сопротивления и температуры в одних и тех же точках);
- прогноз температуры с помощью ЭМ-геотермометра (обученной нейросети).

2. Электромагнитная экстраполяция температуры на глубину

На рис. 1 показан график, иллюстрирующий зависимость средней относительной ошибки ε нейросетевого прогноза (экстраполяции) температуры на глубину (основанного на электромагнитных данных, измеренных на ближайшей к скважине точке МТЗ) от части (δ) профилей температуры / электропроводности, использованных для калибровки.

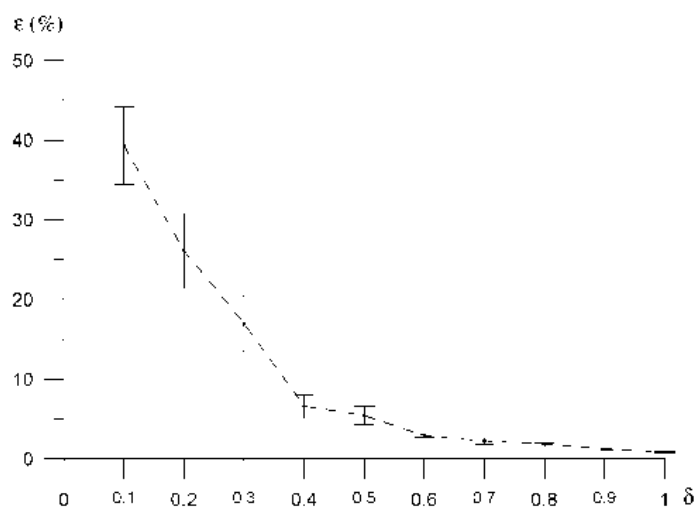


Рис. 20. Зависимость относительной ошибки ε ЭМ-экстраполяции температуры на глубину в зависимости от используемой для калибровки части δ профиля электропроводности и температуры

Из графика видно, что, например, при экстраполяции температуры на глубину, превышающую глубину скважины вдвое, относительная ошибка составляет 5–6 %, а при ее превышении втрое – примерно 20 %. Этот результат позволяет существенно повысить глубинность геотермальных исследований по имеющимся измерениям температуры в скважинах и наземных ЭМ-зондирований в их окрестностях.

3. Электромагнитная интерполяция температуры на межскважинное пространство

При ЭМ-интерполяции термограмм на межскважинное пространство точность контролируется четырьмя факторами: наличием разломов или других глубинных геологических неоднородностей между скважиной и ближайшим пунктом, в котором измерены ЭМ-данные; критической величиной расстояния между ними; наличием или отсутствием внедрения метеорных или других потоков вод с аномальными температурными параметрами; локальными 2D/3D-неоднородностями геологической среды (хотя последний фактор может быть менее значимым, если применять адекватный аппарат инверсии ЭМ-данных, учитывающий размерность среды). Наличие априорной информации о геологических и гидрогеологических условиях может помочь расположить пункты измерений ЭМ-поля в более предпочтительных местах относительно участка, где требуется сделать температурный прогноз, и существенно снизить его ошибки.

4. Построение глубинного разреза температуры в геотермальной области Травале (Италия)

В геотермальном регионе Лардерелло-Травале (Италия) с помощью технологии ЭМ-геотермометра построен двумерный разрез температуры до глубины 10 км (рис. 2, б). Его совместный анализ с построенной ранее моделью удельного сопротивления (рис. 2, а) позволил предположить, что в геотермальной системе Травале тепло переносится перегретыми паро-газообразными, а не жидкими флюидами, как это считалось ранее на основании интерпретации модели удельного сопротивления.

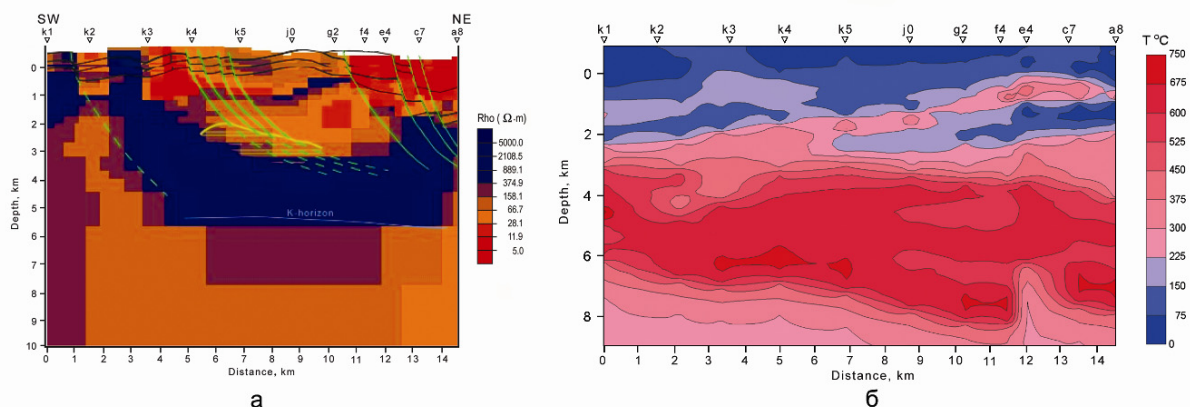


Рис. 21. Разрезы удельного сопротивления (а) и температуры (б) в геотермальной зоне Травале [4, 5]. Треугольники обозначают пункты МТЗ

Другой важный вывод состоит в том, что вместо двух геотермальных резервуаров, о которых предположительно говорили ранее на основании интерпретации электромагнитных и сейсмических данных, по-видимому, следует говорить об одном глубинном резервуаре, имеющем приповерхностное ответвление. Из построенной модели температуры видно, что температуры в этом резервуаре превышают 500 °С, что гово-

рит о целесообразности бурения на такие глубины с целью последующей эксплуатации этого геотермального резервуара.

5. Оценка глубинных температур в геотермальной области Сульц-су-Форе (Франция)

В геотермальной зоне Сульц-су-Форе (Эльзас, Франция) с помощью бесконтактного ЭМ-геотермометра выполнены оценки температуры на глубинах, превышающих глубину пробуренных скважин. Достоверность прогнозов проверена на данных геотермы из глубокой геотермальной скважины глубиной 8175 м.

По данным магнитотеллурических зондирований вдоль субширотного профиля и геотерм из пробуренных ранее скважин (в заброшенном нефтяном участке) построен вертикальный разрез температуры до глубины 5000 м (рис. 3, б). Его анализ показал, что наиболее вероятным доминирующим механизмом передачи тепла на больших глубинах является конвективный механизм с размером конвективных ячеек от одного до трех километров в диаметре.

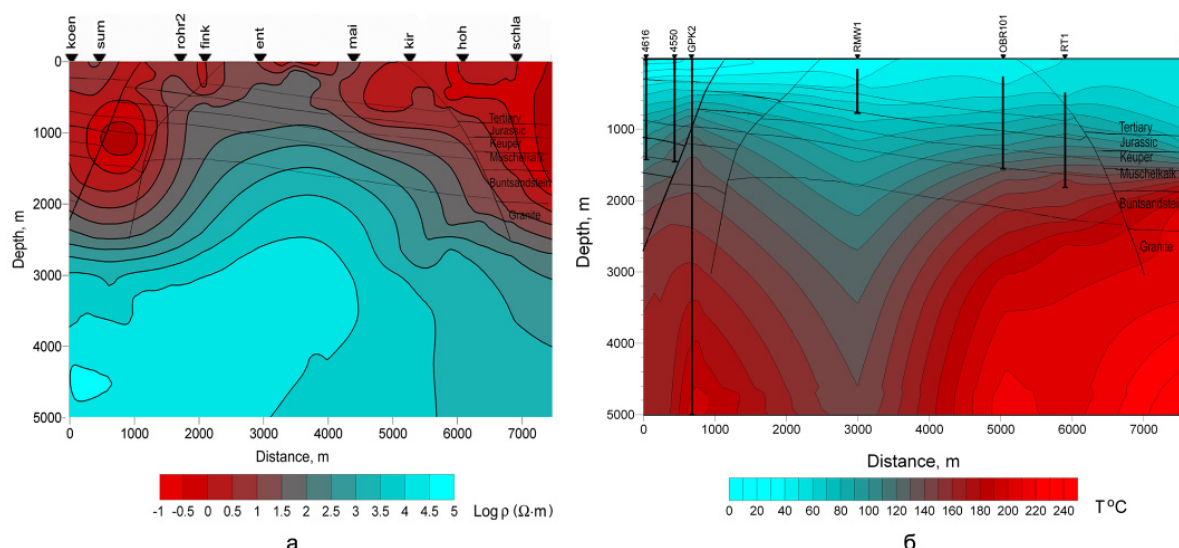


Рис. 22. Разрезы удельного сопротивления (а) и температуры (б) в геотермальной зоне Сульц-су-Форе [4, 5]. Вертикальные линии – геотермальные скважины

Для определения наилучшего местоположения для бурения новой скважины был осуществлен ЭМ-прогноз температуры до глубины 2500 м. По его результатам даны рекомендации, позволяющие сузить область неопределенности при принятии решения о новом бурении.

6. Построение трехмерной модели температуры геотермальной области Хенгидль (Исландия)

Применение технологии бесконтактного ЭМ-геотермометра, основанной на комбинированном использовании всех имеющихся данных электромагнитных зондирований, позволило построить трехмерную модель температуры геотермальной области Хенгидль (Исландия) до глубины 20 км (на рис. 4 приведены ее разрезы вдоль широт).

Анализ построенной модели показал, что в распределении фоновой температуры разреза можно выделить 2 слоя: от 0 до 5 км с температурами ниже 200 °С и от 5 до 20 км с температурами от 200 до 400 °С. На фоне двухслойного разреза температуры коры, состоящей предположительно из габбро, выделяется система связанных между собой высоко-

температурных хорошо проводящих каналов, которые, как «система кровообращения», покрывают рассматриваемую область на глубинах преимущественно 10–15 км и уходят корнями на глубину больше 20 км. В соответствии с построенной моделью температуры исландской коры, источниками тепла геотермальной системы могут быть интрузии магмы, поднявшейся с мантийных глубин через разломы и трещины.

Совместный анализ построенных трехмерных моделей удельного сопротивления и температуры, а также гравитационных аномалий позволил предложить новую концептуальную модель исландской коры, которая, с одной стороны, согласуется с большинством полученных ранее геофизических результатов, а с другой – позволяет объяснить факты, которые не объясняли предыдущие модели.

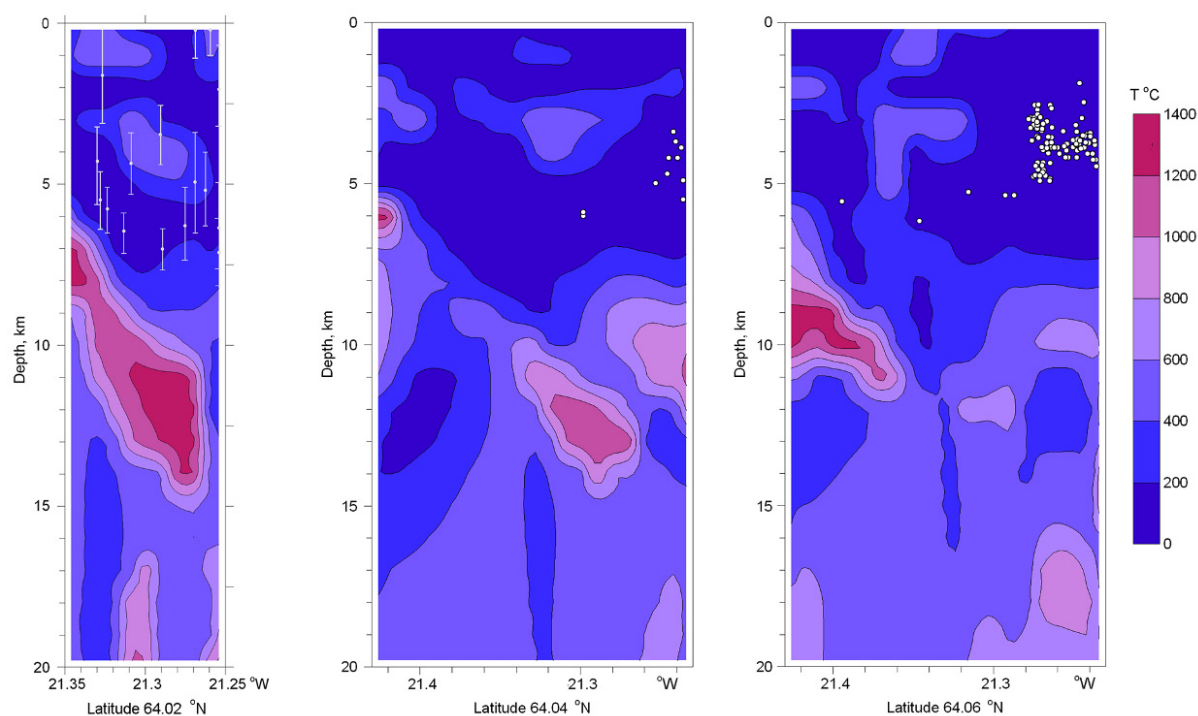


Рис. 23. Разрезы температуры трехмерной модели температуры геотермальной области Хенгидль [4, 5]. Белые точки – гипоцентры землетрясений

Заключение

Результаты работ, проведенных в разных геологических провинциях мира, показали, что ЭМ-геотермометр может успешно использоваться не только для оценки температур в реперных точках, как это делается с помощью других косвенных геотермометров, но и для построения моделей температуры на заданных участках и глубинах. На основе их анализа можно делать выводы о доминирующих механизмах теплопроводности на больших глубинах и расположении возможных источников тепла.

ЭМ-геотермометр может использоваться при интерполяции скважинных измерений на межскважинное пространство, а также для экстраполяции температуры ниже забоя скважин. При этом точность оценок температуры превышает точность, которую можно достичь, используя другие подходы. Это обстоятельство делает его особенно привлекательным при проведении разведочных работ в геотермальной энергетике (особенно при поисках «тепла сухих пород», которое не обязательно сопровождается аномалиями в геофизических полях), а также при поисках углеводородов по аномалиям температуры. Низкая стоимость электроразведочных работ, необходимых для этих целей, несопоставимо мала по сравнению с сейсмической томографией, не говоря уже о

колоссальной экономии за счет необязательного бурения геотермальных скважин на большие глубины и переходе к так называемому «колонковому бурению». Таким образом, применение ЭМ-геотермометра в геотермальной энергетике может резко снизить затраты на разведочное бурение скважин и, за счет этого, повысить ее конкурентоспособность по сравнению с альтернативными источниками энергии.

В этой связи стоит также отметить возможность использования ЭМ-геотермометра для сужения области неопределенности при выборе места для бурения новых эксплуатационных скважин. Положительный опыт его использования с этой целью в геотермальной области Сульц-су-Форе (Франция) можно перенести и на другие геотермальные районы.

На основании проведенных методических исследований можно надеяться, что применение ЭМ-геотермометра на практике позволит проводить оценки температуры в резервуаре геотермальной энергии во время его эксплуатации по режимным наблюдениям ЭМ-поля на поверхности (т. е. осуществлять четырехмерный мониторинг температуры), а также осуществлять дистанционную оценку температуры в скважинах на участках, характеризующихся экстремальными для традиционных геотермометров условиями.

Библиографический список

1. Спичак В. В. Электромагнитное зондирование геотермальных зон: новые горизонты / В. В. Спичак // Геофизика. – 2008. – № 1. – С. 50–67.
2. Спичак В. В. Геофизические методы разведки геотермальных ресурсов / В. В. Спичак // Разведка и охрана земных недр. – 2010. – № 2. – С. 25–29.
3. Пат. 2326413 Российская Федерация от 10.06.2008. Способ оценки температуры в недрах Земли / Спичак В. В., Захарова О. К.
4. Спичак В. В. Электромагнитный геотермометр / В. В. Спичак, О. К. Захарова. – М. : Научный мир, 2013. – 172 с.
5. Spichak V. V., Zakharova O. K. Electromagnetic geothermometry / V. V. Spichak, O. K. Zakharova. – Amsterdam : Elsevier, 2015. – 182 p.



УДК 550.831

С. Г. Бычков^{^1}, А. А. Симанов^{^1}

ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ[†]

Аннотация. Представлены результаты гравиметрических работ, проводимых с целью изучения плотностного строения толщи Верхнекамского калийного месторождения. Показано, что современные методы обработки и интерпретации высокоточных гравиметрических исследований, проведение мониторинговых съемок существенно повышают возможности гравиразведки для изучения геологического строения солевой и надсолевой толщ. Приведены примеры гравиметрических исследований на аварийных участках рудников.

Ключевые слова: гравиразведка, месторождения солей, аномалия гравитационного поля, мониторинг, динамическая гравитационная аномалия.

Об авторах:

^{^1} Горный институт УрО РАН, Пермь, bsg@mi-perm.ru.

[†] Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-45-590426).

S. G. Bychkov, A. A. Simanov

GRAVITY INVESTIGATIONS OF POTENTIALLY DANGEROUS AREAS OF THE VERKHNEKAMSKOE POTASH SALT DEPOSIT

Abstract. *The results of gravimetric survey conducted to study the density structure of the Verkhnekamskoe potash deposit strata are presented. It is shown that the modern processing and interpretation methods of high-precision gravimetric researches, implementation of monitoring gravity surveys significantly increase opportunities for gravity studying of geological structure of the salt and suprasalt layers. Examples of gravimetric survey on emergency mine area are given.*

Keywords: *gravity survey, salt deposits, gravity anomaly, monitoring, dynamic gravity anomaly.*

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС), расположенное в пределах Пермского края, является единственной сырьевой базой калийной промышленности России [1]. Благодаря масштабам месторождения и его практическому значению изучению геологического строения всегда уделялось большое внимание. Немаловажную роль в комплексе геолого-геофизических методов играют гравиметрические исследования.

Гравиразведка на ВКМКС применяется с 1920–1930-х гг. К концу 1990-х гг. практически вся территория месторождения была покрыта гравиметрическими съемками масштаба 1:50 000 и 1:25 000 (рис. 1). В результате интерпретации полученных гравиметрических материалов проведено тектоническое районирование, уточнена карта поверхности соляной толщи и контуры крупных соляных структур, изучено строение подсолевых отложений. С начала 1990-х гг. совершенствование инструментальной базы гравиметрических исследований, развитие методов наземно-подземной гравиметрии и создание современных программно-алгоритмических комплексов обработки и интерпретации результатов съемок существенно расширили возможности гравиразведки для изучения геологического строения солевой и надсолевой толщ ВКМКС [2]. На новом этапе целью исследований явилось уже не только решение задач по изучению строения месторождения, но и обеспечение безопасности его освоения путем выявления разуплотненных и трещиноватых зон, оценки влияния техногенных воздействий, обусловленных добычей полезных ископаемых, на геологическую среду.

Геологический разрез месторождения представлен породами нижнепермского возраста. В верхней части разреза от земной поверхности до глубины примерно 150 м находится терригенно-карбонатная толща, имеющая плотность 2,40–2,49 г/см³. Ниже залегают глинисто-мергелистые породы мощностью 90 м и плотностью около 2,30 г/см³. Далее находится комплекс, включающий переходную толщу – переслаивание галита и глины переменной мощности, а также покровную каменную соль со средней плотностью 2,15 г/см³. Продуктивная толща имеет по площади значительную изменчивость литологического состава и представлена переслаиванием сильвинита и карналлита со средней плотностью 2,10 г/см³ и мощностью около 70 м. Ниже залегает подстилающая каменная соль со средней плотностью 2,13 г/см³, ее мощность изменяется от 150 м до 400 м, а подошва залегает на глубине около 700 м. Основным объектом изучения для гравиметрии является водозащитная толща (ВЗТ), включающая в основном переходную толщу, покровную каменную соль и верхнюю часть продуктивной толщи (до горных выработок) [1]. Нарушения сплошности ВЗТ зачастую приводят к аварийному затоплению рудни-

ков, как это произошло в 1986 г. на Третьем (БКРУ-3) и в 2007 г. на Первом Березниковском (БКРУ-1) рудниках.

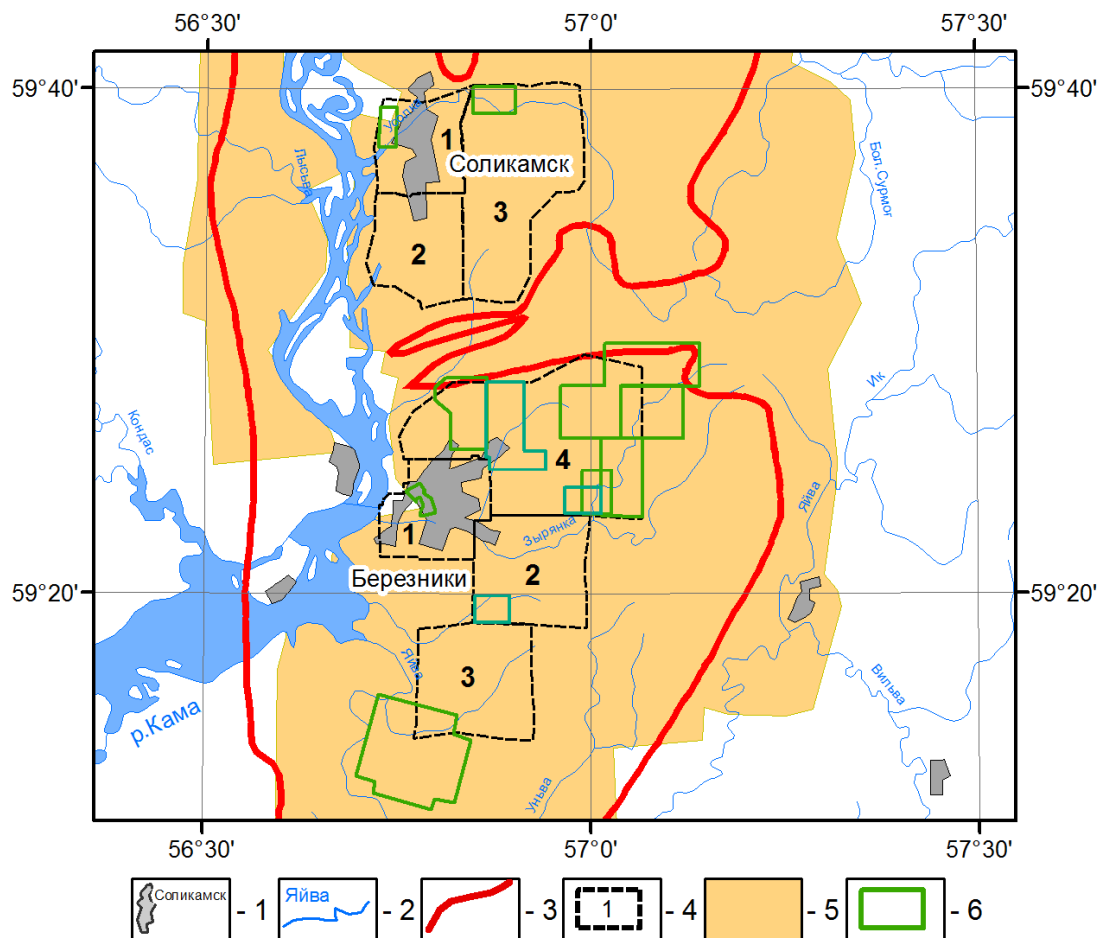


Рис. 1. Изученность Верхнекамского месторождения калийных солей гравиметрическими съемками:

- 1 – города; 2 – реки; 3 – контур ВКМКС; 4 – границы шахтных полей и номера рудников;
5 – ранее проведенные работы масштаба 1:25 000 – 1:50 000;
6 – съемки Горного института УрО РАН масштаба 1:5 000 – 1:10 000

С помощью гравиразведки на ВКМКС решаются в основном геологические задачи двух видов.

1. Выявление участков повышенной опасности, т. е. участков пониженной плотности пород с ослабленными механическими свойствами в водозащитной толще, изучение и уточнение деталей геологического строения с прогнозированием геодинамических условий на конкретных участках месторождения до проведения горных работ.
2. Изучение изменения плотностной характеристики геологической среды под воздействием горных работ, наблюдения за динамикой развития разуплотненных зон в подработанном массиве.

Высокая информативность гравиметрических данных на Верхнекамском месторождении достигается путем использования высокоточной гравиметрической и топографо-геодезической аппаратуры. Необходимая детальность обеспечивается проведением высокоточных крупномасштабных съемок масштаба 1:5 000 и 1:10 000. Обработка и интерпретация гравиметрических данных производится комплексом

программ, разработанных в Горном институте, основной из которых является система векторного сканирования (VECTOR), позволяющая создавать трехмерную плотностную модель геологической среды, адекватную наблюдаемому полю и имеющейся геологической информации. Одновременно с разработкой методики наблюдений и созданием интерпретационных программ обобщается имеющийся материал по параметрическому обеспечению гравиметрических работ. Собраны и систематизированы данные о плотностях толщ и образцов, слагающих геологический разрез месторождения. Анализ и обобщение разнородной информации осуществляется в информационно-аналитической системе ГРАВИС, созданной на основе геоинформационной системы ArcGis 9.0 [3]. Разработана серия программных модулей, сконструированных на основе новых алгоритмов и методов работы с геолого-геофизической информацией – от первичной обработки материалов гравиметрической съемки до построения модели объекта исследований [4].

С целью выявления вариаций силы тяжести, связанных с техногенным воздействием на геологическую среду, на ВКМКС проводятся повторные и мониторинговые гравиметрические наблюдения [5]. Мониторинговые наблюдения поля силы тяжести выявляют динамику процессов деформации породных масс и позволяют осуществить прогноз опасных и катастрофических ситуаций. По результатам повторных наблюдений рассчитывается динамическая аномалия силы тяжести, определяемая как разность между последующими и предыдущими значениями силы тяжести. Особенностью подобных аномалий является их независимость от влияния рельефа земной поверхности, стационарных (неизменных) плотностных неоднородностей в массиве, обусловленных геологическим строением. Поскольку все неизменные составляющие гравитационного поля в равной степени присутствуют в любой паре наблюдений, динамическая аномалия соответствует конкретному горнотехническому процессу.

Особенно эффективным является применение мониторинговых (повторных) наблюдений на участках аварийных ситуаций: на Третьем Березниковском руднике, где в 1986 г. произошел прорыв вод в шахту с последующим формированием провала в земной поверхности и затоплением рудника; в 1995 г. на Втором Соликамском руднике для изучения ситуации на участке катастрофического обрушения пород в горных выработках, сопровождавшегося формированием мульды оседания на земной поверхности, и последующего провала земной поверхности в 2014 г.; на Втором Березниковском руднике – в районе сейсмического явления, произошедшего в 1997 г. В 2001 г. проведены детальные исследования в южной части Березниковского соляного купола на границе отработанного пространства БКРУ-1, где на земной поверхности сформировалась серия канавообразных провалов. В 2006 г. гравиметрические наблюдения выполнены в районе первого провала земной поверхности на Первом Березниковском руднике; в 2010–2011 гг. – в районе второго и третьего провалов на этом же руднике [5]. Авариям на БКРУ-1 было уделено особое внимание, поскольку шахты рудника находятся непосредственно под г. Березники.

В последнем случае проведено три цикла гравиметрических наблюдений:

- в декабре 2010 г. после провала земной поверхности на железнодорожных путях в г. Березники,
- в феврале 2011 г. с целью изучения динамики геологических процессов, происходящих в окрестности провала,
- в сентябре 2011 г. в зоне повышенных оседаний земной поверхности к северу от провала.

В декабре 2010 г. детальная гравиметрическая съемка проведена на участке площадью 0,9×1,1 км по сети 50×50 м. В районе провала выявлена отрицательная аномалия

силы тяжести диаметром порядка 250 м и амплитудой 0,2 мГал (рис. 2, а). Совместный анализ результатов гравиметрической съемки и геологической ситуации позволил сделать вывод о том, что конкретная причина провала земной поверхности заключается в формировании пустотного очага в надсоляной толще. На трансформантах гравитационного поля выделены цепочки отрицательных аномалий, ориентированных на север от провала.

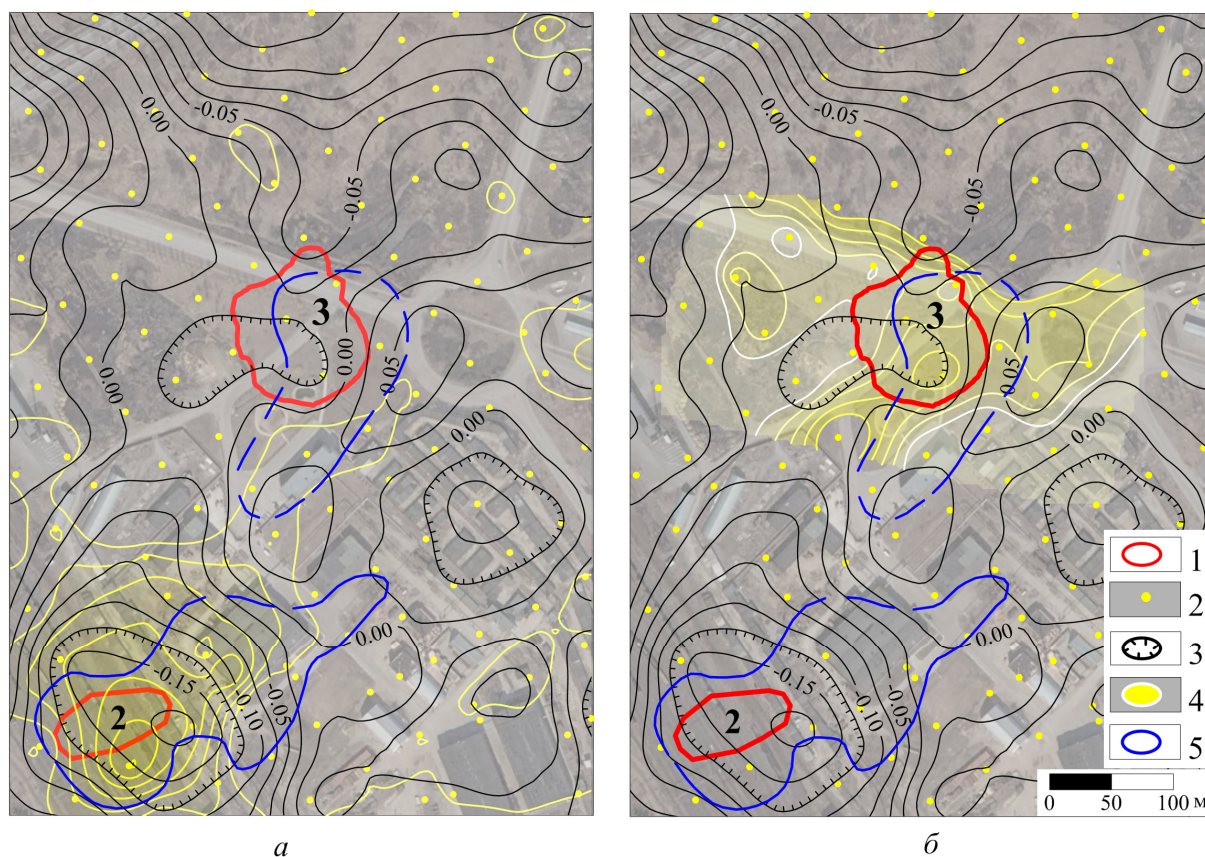


Рис. 2. Локальные гравитационные и динамические аномалии силы тяжести:

- а) в период от декабря 2010 г. до февраля 2011 г.; б) от февраля 2011 г. до сентября 2011 г.; 1 – контуры провалов (2 – ноябрь 2010 г., 3 – декабрь 2011 г.); 2 – пункты гравиметрических наблюдений; 3 – локальные отрицательные гравитационные аномалии; 4 – динамические аномалии силы тяжести; 5 – зоны повышенных оседаний земной поверхности

Повторная съемка на этом участке проведена через два месяца. За этот период амплитуда отрицательной аномалии поля Δg в районе провала увеличилась с 0,2 мГал до 0,3 мГал. Это соответствует уменьшению плотности в очаге разуплотнения на 50 %. Таким образом, было зафиксировано наличие интенсивных процессов, происходящих в районе провала.

В сентябре 2011 г. в зоне повышенных оседаний земной поверхности к северу от провала вновь проведена гравиметрическая съемка, по результатам которой выявлена динамическая аномалия силы тяжести, свидетельствующая о продолжении процесса разуплотнения пород. Динамическая аномалия пространственно совпадает с ранее выявленной локальной отрицательной аномалией силы тяжести (рис. 2, б). Дальнейшее развитие событий привело к образованию еще одного (третьего на Первом руднике) провала земной поверхности в пределах обнаруженной цепочки отрицательных локальных аномалий гравитационного поля и динамической аномалии.

Последующие наблюдения за оседанием земной поверхности на территории г. Березники выявили отдельные участки повышенных оседаний, на которых были поставлены геофизические работы, включающие высокоточную гравиразведку. Один из участков находится в юго-западной части г. Березники, в пределах затопленного шахтного поля БКРУ-1, на территории жилой застройки (рис. 3).

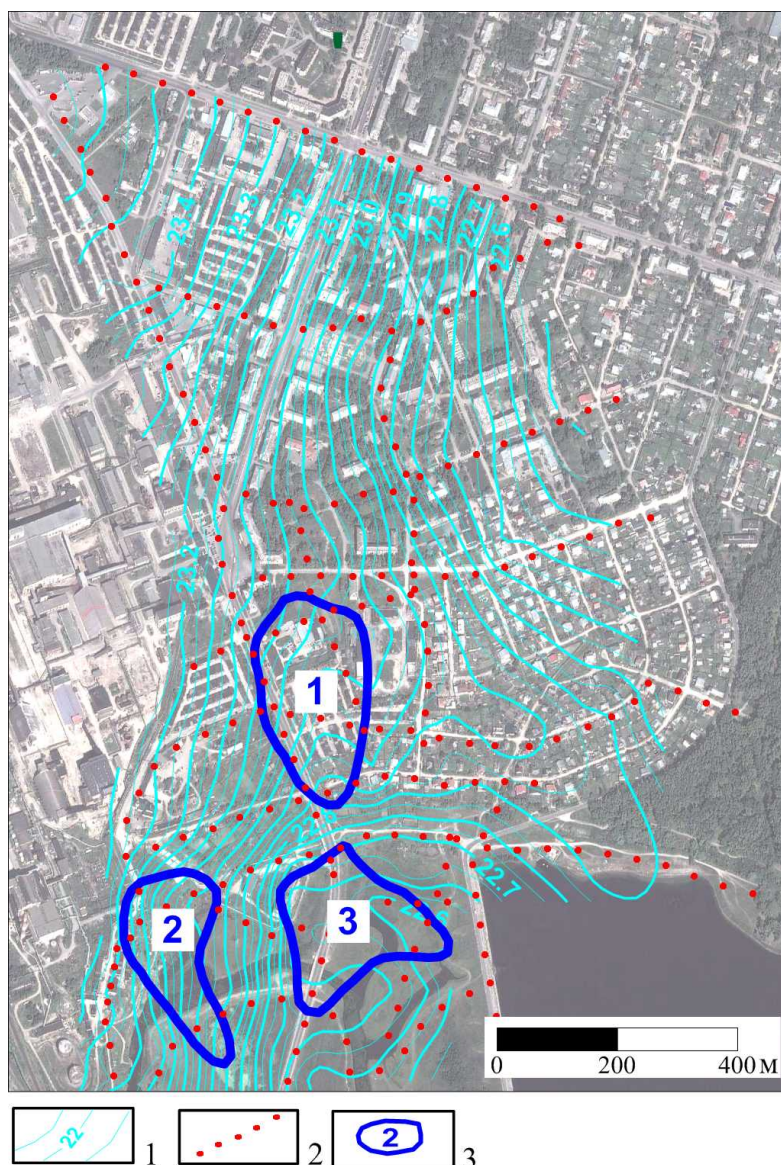


Рис. 3. Гравитационное поле на фоне городской застройки:

- 1 – изоаномалы гравитационного поля (мГал); 2 – пункты гравиметрических наблюдений, 3 – локальные отрицательные аномалии силы тяжести и их номер

В 300 м западнее площади исследований находится провал земной поверхности, произошедший в 2006 г., приведший к затоплению рудника. В 400 м к северо-западу от изучаемой площади расположен провал земной поверхности у железнодорожного вокзала, произошедший в ноябре 2010 г. В 200 м севернее от площади расположен провал, произошедший в декабре 2011 г., интерпретация гравитационных данных показана выше. В связи с тем, что территория находится в черте города, сеть гравиметрических наблюдений являлась не оптимальной для подобных исследований: большое расстояние между профилями (150–350 м) и малое расстояние между гравиметрическими

пунктами по профилям (50 м). Средняя квадратическая погрешность проведенной съемки составила $\pm 0,009$ мГал.

Интерпретация полученных аномалий силы тяжести позволила выявить ряд локальных отрицательных аномалий, обозначенных на рис. 3 номерами 1–3. Наиболее отчетливо на 3D-трансформанте гравитационного поля, построенной в системе VEC-TOR, проявляется аномалия № 1 (рис. 4). Ее размеры составляют примерно 200–350 м, амплитуда порядка 0,025 мГал. С увеличением окна сканирования гравитационного поля (коэффициент k на вертикальной оси диаграммы) амплитуда аномалии существенно уменьшается. На трехмерной трансформанте поля (рис. 4) видно, что данная аномалия не имеет глубинных «корней».

Аномалии № 2 и 3 имеют большую амплитуду, причем с увеличением окна сканирования амплитуда аномалий увеличивается (рис. 4). Вероятно, они обусловлены сочетанием двух основных факторов: поднятием кровли солей к югу и востоку от изучаемого участка и заболоченной поймой протекающей здесь реки.

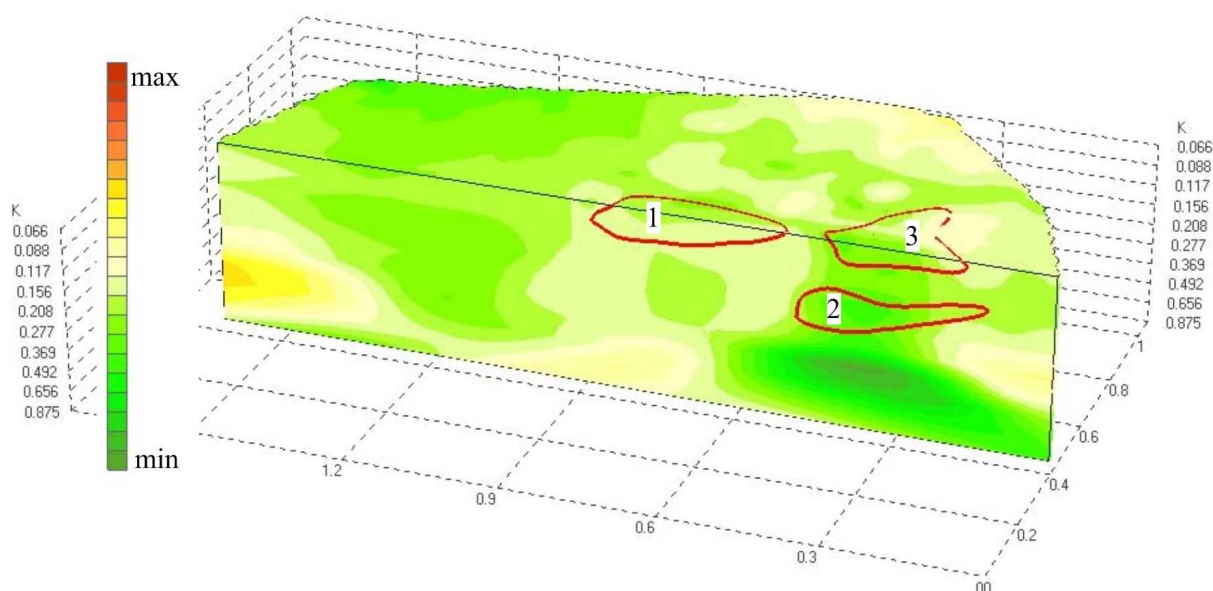


Рис. 4. Вертикальное сечение 3D-диаграммы гравитационного поля

Подтвержденная другими геофизическими методами (малоглубинная сейсморазведка и электроразведка ВЭЗ), потенциально опасная зона в районе аномалии № 1 была ограждена. В начале 2015 г. здесь (около бывшей школы № 26) обнаружена воронка на земной поверхности диаметром 5 метров. Образовался шестой провал на шахтных полях ВКМКС (пятый на территории г. Березники).

Приведенные примеры убедительно показывают, что гравиметрические исследования на Верхнекамском месторождении вносят определенный вклад в изучение картины плотностной неоднородности верхней части разреза, в обеспечение безопасности жизнедеятельности. Изменения плотности пород в горном массиве, происходящие под влиянием горно-геологических условий, отчетливо фиксируются в гравитационном поле. Реализуя возможности современных методов интерпретации гравитационных аномалий с использованием априорной геологической информации, можно успешно решать сложные геологические задачи, выделять участки повышенной опасности при отработке продуктивных пластов и изучать изменения плотностной характеристики геологической среды под воздействием горных работ.

Библиографический список

1. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей / А. И. Кудряшов. – Пермь : ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.
2. Щербинина Г. П. Гравиметрические исследования при решении горно-геологических задач на Верхнекамском месторождении калийных солей / Г. П. Щербинина, Г. В. Простолупов, С. Г. Бычков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 29–36.
3. Симанов А. А. Информационно-аналитическая система обеспечения крупномасштабных гравиметрических съемок / А. А. Симанов // Геоинформатика. – 2007. – № 4. – С. 1–11.
4. Бычков С. Г. Построение объемных моделей геологических объектов по гравитационному полю на основе синтеза качественных и количественных методов интерпретации / С. Г. Бычков, А. С. Долгаль, В. И. Костицын, А. В. Мичурин, А. А. Симанов // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 47–54.
5. Бычков С. Г. Гравиметрический мониторинг территории разработки Верхнекамского месторождения калийных солей / С. Г. Бычков, Г. В. Простолупов, Г. П. Щербинина // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 22–25.



УДК 550.83

И. Ю. Митюнина¹, С. Г. Бычков²ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПОПРАВОК
ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Аннотация. Предложена технология построения геолого-геофизической модели верхней части разреза на основе комплексной интерпретации материалов сейсморазведки МОГТ, высокоточной гравиразведки и электроразведки ВЭЗ. Технология реализована на базе геоинформационной системы ArcGIS. Построенная модель позволяет осуществлять учет влияния неоднородностей верхней части разреза при обработке и интерпретации геофизических данных.

Ключевые слова: сейсморазведка, гравиразведка, электроразведка, верхняя часть разреза, статические поправки.

Об авторах:

¹ К. г.-м. н., доцент каф. геофизики, Пермский государственный университет, Пермь, bsg-home.mail.ru.

² Д. г.-м. н., зав. лаб., Горный институт УрО РАН, Пермь, bsg@mi-perm.ru.

I. Yu. Mityunina, S. G. Bychkov

EVALUATION OF STATIC CORRECTIONS
IN COMPLEX OF GEOPHYSICAL METHODS

Abstract. Technology of construction of geologic-geophysical model of the near-surface section by complex interpretation of CDP data, high-precision gravity measurements and vertical electrical sounding is suggested. Technology is realized on the base of ArcGIS. Model created makes it possible to consider near-surface inhomogeneities' effects on processing and interpretation of geophysical data.

Keywords: seismic prospecting, gravity prospecting, electrical prospecting, near-surface section, statics.

Введение

Детальная геолого-геофизическая модель верхней части разреза (ВЧР) играет большую роль при интерпретации геофизических данных. В сейсморазведке МОГТ

весьма остро стоит проблема подготовки статических поправок, исключающих скоростные неоднородности пород (ВЧР) из времен регистрации целевых отражающих горизонтов. В гравиразведке она необходима для введения поправок за промежуточный слой. Особенно актуально построение объемной геолого-геофизической модели ВЧР в условиях развития соляной тектоники, туффово-траппового магматизма, резкопересеченного рельефа местности, типичных для нефтепоисковых районов Восточной Сибири, где традиционные методы расчета статических поправок, применяемые в сейсморазведке, имеют определенные ограничения [1].

В сейсморазведке МОГТ существуют автоматизированные способы формирования скоростной модели ВЧР, основанные на использовании либо данных специальных полевых наблюдений по изучению ВЧР (метод преломленных волн), либо времен первых вступлений сейсмограмм МОГТ. Однако основным недостатком большинства из них является применение методов решения обратной задачи с использованием упрощенных моделей строения среды, что не позволяет получать высокую точность результатов во многих регионах [2]. Поэтому в сейсморазведке зачастую используют данные других геофизических методов, прежде всего гравиразведки [3–7] и электроразведки различных модификаций [8, 9], для построения детальной модели ВЧР и расчета статических поправок.

Использование гравиметрических данных для определения статических поправок основано на существовании тесной корреляционной зависимости между скоростью распространения сейсмических волн и плотностью пород, поэтому неоднородности в ВЧР находят свое отражение как в сейсмическом, так и в гравитационном полях. Вычисление статических поправок по электроразведочным данным также основано на выявлении корреляционной зависимости между акустическими и геоэлектрическими характеристиками разреза, однако существует сильная изменчивость характера этой связи в пределах площади исследований [9]. В то же время по данным электрических или электромагнитных зондирований можно выполнить детальное расчленение геологического разреза ВЧР.

Очевидно, что комплексирование взаимодополняющих геофизических методов существенно повышает достоверность построения физико-геологической модели верхней части разреза [10]. На примере одной из нефтеперспективных площадей, расположенной на территории Пермского края, рассмотрим технологию построения геолого-геофизической модели ВЧР с последующим расчетом статических поправок по комплексу геофизических методов, включающих сейсморазведку 2D, детальную гравиразведку и электроразведку ВЭЗ.

1. Объект исследований

Исследуемая площадь, характеризующаяся сильной изрезанностью рельефа поверхности наблюдений (рис. 1), расположена в Соликамской депрессии Предуралья Краевого прогиба. Месторождение нефти здесь приурочено к позднедевонской органогенной постройке, залегающей на глубине около 2000 м, и структурам ее облекания в визейской терригенной и башкирской карбонатной толщах. Выше по разрезу на глубинах порядка 200–400 м расположены залежи крупнейшего в России Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей.

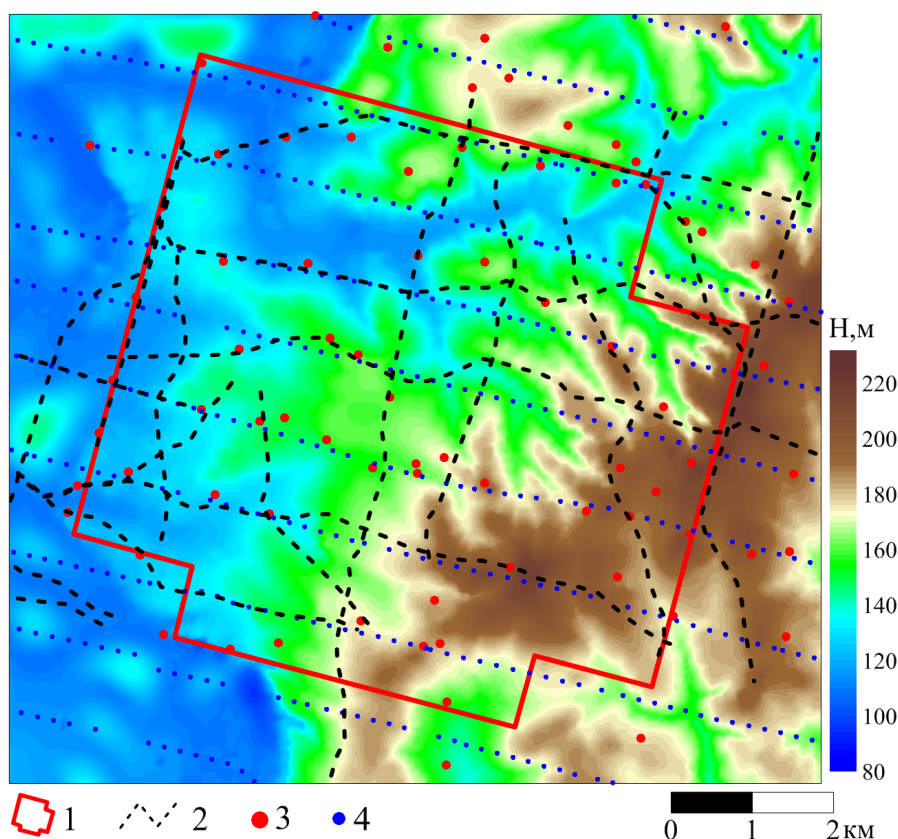


Рис. 1. Схема изученности площади:

1 – площадь съемки сейсморазведки 3D и гравиразведки; 2 – профили сейсморазведки 2D;
3 – скважины с МСК; 4 – пикеты электроразведки ВЭЗ

С целью детального изучения геологического строения месторождения нефти на данной площади поставлена сейсморазведка 3D (ОАО «Пермнефтегеофизика») по сети профилей 250×300 м. Ранее на изучаемой территории проводились сейсморазведочные работы 2D и имеется достаточно большой объем углубленных скважин, где были выполнены микросейсмокаротажные (МСК) работы по изучению скоростного строения ВЧР.

Гравиметрическая съемка, основной задачей которой являлась локализация плотностных неоднородностей в нижнепермской надсолевой и соляной толщах, выполнена Горным институтом УрО РАН по сейсмическим профилям 3D с шагом 50 м. Среднеквадратическая погрешность определения аномалий Буге составила $\pm 0,028$ мГал. На обрамлении данной площади имеются кондиционные карты аномалий силы тяжести масштаба 1:25 000, которые использовались для учета краевых эффектов при трансформациях гравитационного поля.

Кроме того, в пределах изучаемой территории были проведены площадные электроразведочные работы ВЭЗ масштаба 1:25 000 с целью обнаружения электрических неоднородностей в разрезе надсоляной толщи, оконтуривания и детализации аномальных участков, установления их связи с особенностями геологического строения.

Создание скоростной модели верхней части разреза по комплексу геофизических методов осуществлялось в несколько этапов. Вначале в пределах площади сейсмической съемки 3D были рассчитаны статические поправки по материалам каждого из геофизических методов. Комплексная модель ВЧР построена в геоинформационной системе ArcGIS.

2. Интерпретация данных сейсморазведки 2D

Изучение скоростного строения ВЧР по материалам сейсморазведки 2D осуществлялось по технологии, разработанной на кафедре геофизики Пермского государственного университета [11]. На полевых сейсмограммах проведена корреляция времен первых вступлений, построены временные поля первых волн и выполнена их обработка и интерпретация в предположении о регистрации в первых вступлениях головных преломленных волн. В результате получены скоростные модели разреза вдоль профилей 2D, на основе которых с помощью программного обеспечения Target для ArcGIS (Geosoft, Inc.) создана трехмерная (воксельная) модель скоростного строения верхней части разреза (рис. 2).

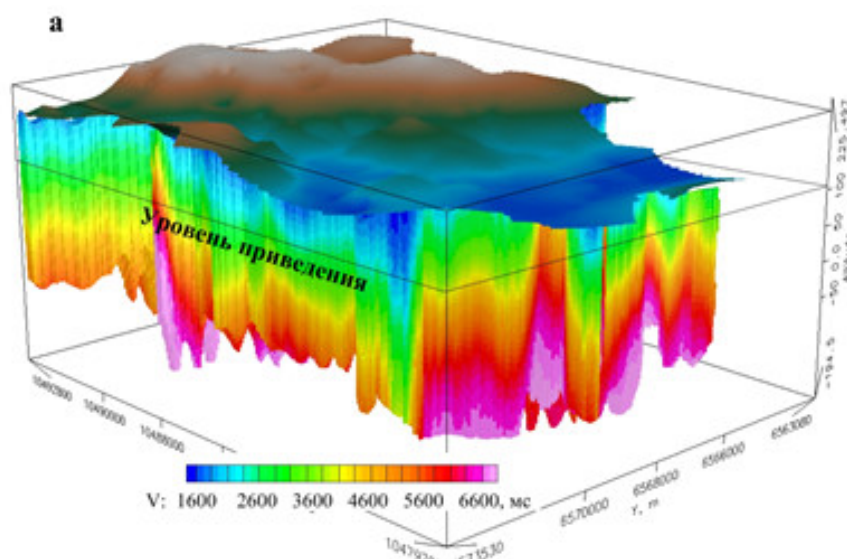


Рис. 2. Скоростная модель разреза по данным интерпретации первых волн

Анализ модели показал, что значения скоростей сейсмических волн в ВЧР, определенные по первым волнам, заметно завышены по сравнению со скважинными данными, что, вероятно, связано с существенной квазианизотропией скоростных свойств разреза, характерной для слоистых сред. Корректировка скоростной модели ВЧР осуществлялась без учета данных МСК, по материалам сейсмокаротажа трех глубоких скважин, имеющих на данной площади. На основе сопоставления скоростных моделей разреза, построенных в точках СК по скважинным данным и по результатам интерпретации временных полей первых волн, были рассчитаны коэффициенты квазианизотропии, которые после интерполяции в пределах изучаемой территории использовались для корректировки скоростной модели ВЧР и расчета статических поправок.

3. Алгоритм интерпретации гравиразведочных данных

Интерпретация гравиметрических данных с целью изучения плотностного строения ВЧР проводилась в системе VECTOR [12], позволяющей эффективно осуществлять разделение составляющих поля от разноглубинных источников. Из предварительно редуцированного за влияние толщи солей поля силы тяжести выделены локальные составляющие, вычисленные с различными параметрами трансформации системы VECTOR [4]. Полученные локальные аномалии сравнивались с картой скоростей ВЧР, построенной по данным МСК, и выбрана локальная составляющая, которая наилучшим образом согласуется со скоростями упругих волн в толще ВЧР (рис. 3).

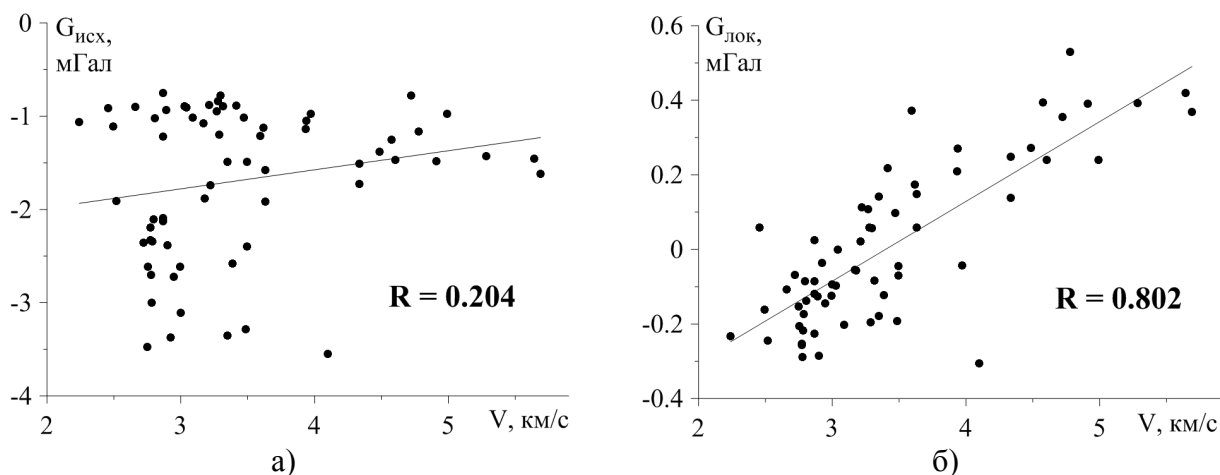


Рис. 3. Корреляционные зависимости между скоростью волн в ВЧР и наблюдаемыми аномалиями силы тяжести (а) и трансформантой поля (б)

Вычисление плотности пород ВЧР осуществлялось путем решения обратной линейной задачи гравиметрии, с использованием составляющей поля, выделенной на предыдущем этапе. В качестве начального приближения используется средняя плотность пород ВЧР. Решение обратной задачи осуществляется для слоя, ограниченного сверху рельефом местности, снизу – уровнем приведения. Аппроксимация слоя производится набором прямоугольных параллелепипедов, каждый из которых задается с плотностью σ_{ij} . Решение обратной линейной задачи осуществляется в точках $\{x_i, y_j\}$, расположенных на земной поверхности, по формуле [12]:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + (\Delta g_{ij}^{нб} - \Delta g_{ij}^{мод})\alpha,$$

где n – номер итерации; $\Delta g^{нб}$ и $\Delta g^{мод}$ – соответственно исходное и модельное поля; α – параметр регуляризации.

Далее с использованием корреляционной зависимости массив плотностей пород ВЧР преобразован в скорости сейсмических волн, на основании которых вычислены статические поправки.

4. Интерпретация электроразведочных данных

Алгоритм расчета статических поправок по электроразведочным данным включал следующие операции:

- интерпретация кривых зондирования в рамках квазиоднородно-слоистой модели разреза;
- построение трехмерной геоэлектрической модели разреза;
- вычисление интегральных электрических характеристик толщи ВЧР;
- определение корреляционной зависимости между электрическими и упругими параметрами пород ВЧР и вычисление на ее основе статических поправок.

Для расчета статических поправок были использованы результаты переинтерпретации материалов ВЭЗ в пакете программ IPI-1D (МГУ). На их основе с помощью геостатистических методов интерполяции (кригинг с линейной вариограммой) была построена трехмерная геоэлектрическая модель приповерхностной части разреза и вычислены значения суммарной продольной проводимости в толще ВЧР (рис. 4, а). Сопоставление интегральных электрических характеристик со значениями статических поправок в точках МСК показало наличие достаточно тесной корреляционной зависимости между электрическими и упругими параметрами пород ВЧР, которая с коэффициентом корреляции 0,67 может быть аппроксимирована линейным уравнением:

$$\Delta t_{\text{ст}} = 14,02 + 12,97S,$$

где $\Delta t_{\text{ст}}$ и S – соответственно значения статических поправок и суммарной продольной проводимости (рис. 4, б).

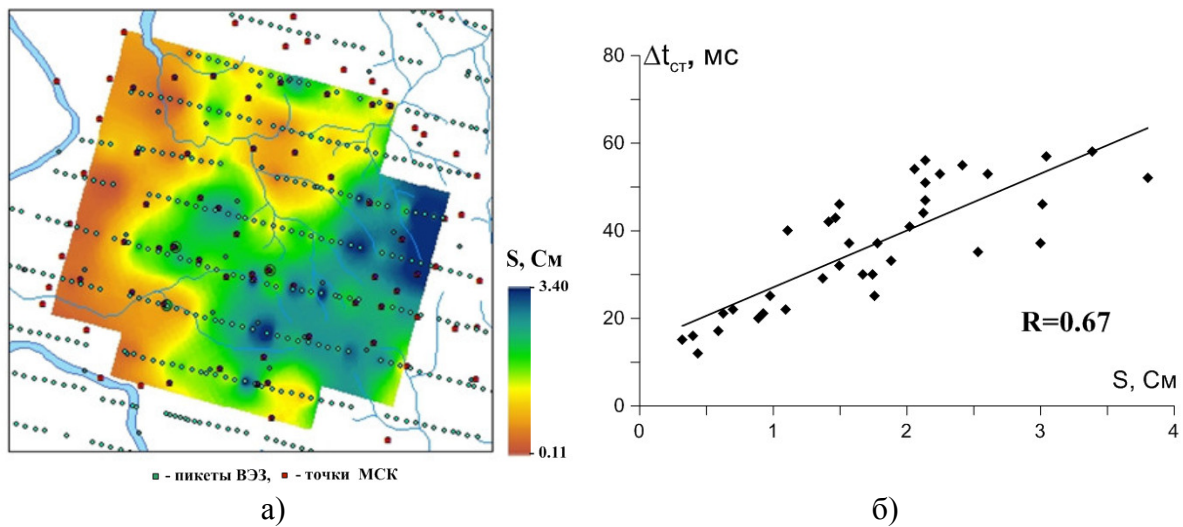


Рис. 4. Определение статических поправок по данным ВЭЗ:

а) карта продольной проводимости, б) зависимость между статическими поправками и проводимостью пород

Полученное уравнение регрессии использовалось для вычисления статических поправок по данным электроразведки ВЭЗ.

5. Создание комплексной модели верхней части разреза

Сравнение карт статических поправок, построенных по данным сейсмической съемки 2D, результатам интерпретации гравиметрических и электроразведочных наблюдений, свидетельствует о сопоставимости полученных результатов. Однако в отдельных точках наблюдения отмечается значительное (до 15–20 мс) различие статических поправок, определенных различными методами. Это обусловлено, во-первых, многофакторной и опосредовательной связью между плотностными, электрическими и упругими свойствами пород ВЧР, которую сложно выявить в ходе корреляционного анализа ограниченного набора данных. Во-вторых, это может быть связано с погрешностями интерполяции данных в условиях редкой и крайне неравномерной сети полевых сейсмических наблюдений 2D и электроразведки ВЭЗ.

Для создания комплексной модели верхней части разреза в геоинформационной системе ArcGIS была проведена геообработка grid-моделей статических поправок, полученных различными методами. Сопоставление моделей осуществлялось с помощью процедуры взвешенного суммирования растровых слоев. При этом вес отдельной точки в пределах одной grid-модели (слоя) выбирался с учетом ее удаленности от пункта наблюдения соответствующего метода, а весовой коэффициент слоя зависел от тесноты корреляционной связи между значениями статических поправок, полученных отдельным методом, и данными МСК. Окончательные значения статических поправок вычислялись как средневзвешенные по трем методам (рис. 5). При этом вклад каждого слоя в итоговую модель определялся с помощью ввода весового коэффициента слоя, который

соответствовал коэффициенту корреляции (R) между значениями статических поправок, полученных данным методом, и Δt_{cm} по данным СК (МСК).

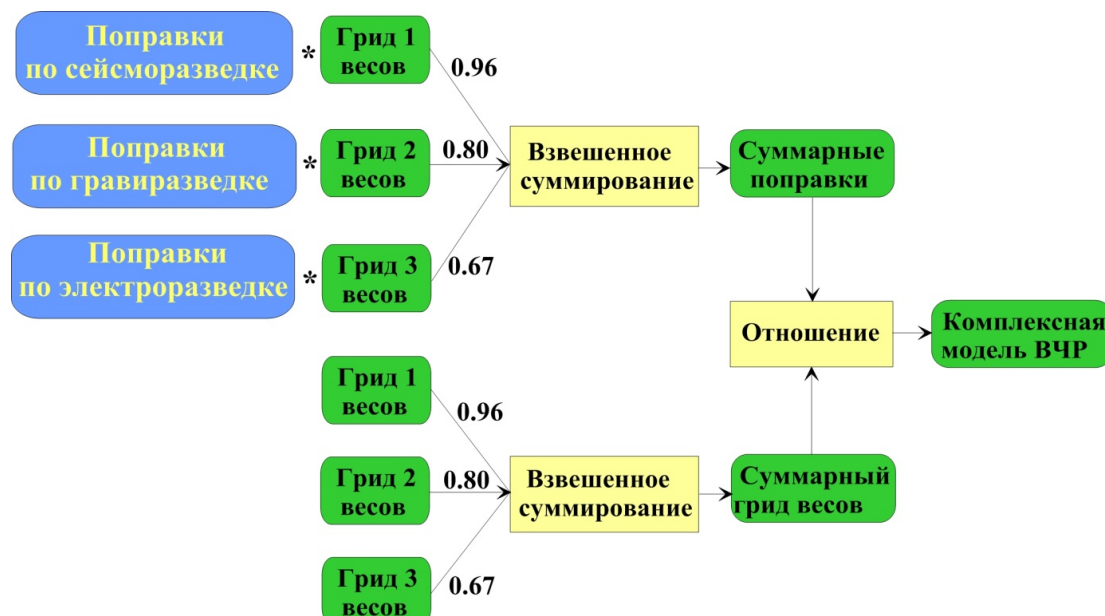


Рис. 5. Блок-схема создания комплексной модели ВЧР

Оценка точности статических поправок, вычисленных по комплексу геофизических методов (рис. 6, а), проведена путем сравнения их с данными МСК. Среднеквадратическое отклонение значений поправок составило $\pm 2,3$ мс. Для сравнения, погрешность статических поправок, рассчитанных в ОАО «Пермнефтегеофизика» по временам первых вступлений в комплексе программ Millennium (Green Mountain Geophysics) и использованных при промышленной обработке материалов сейсморазведки 3D, равна $\pm 3,3$ мс (рис. 6, б).

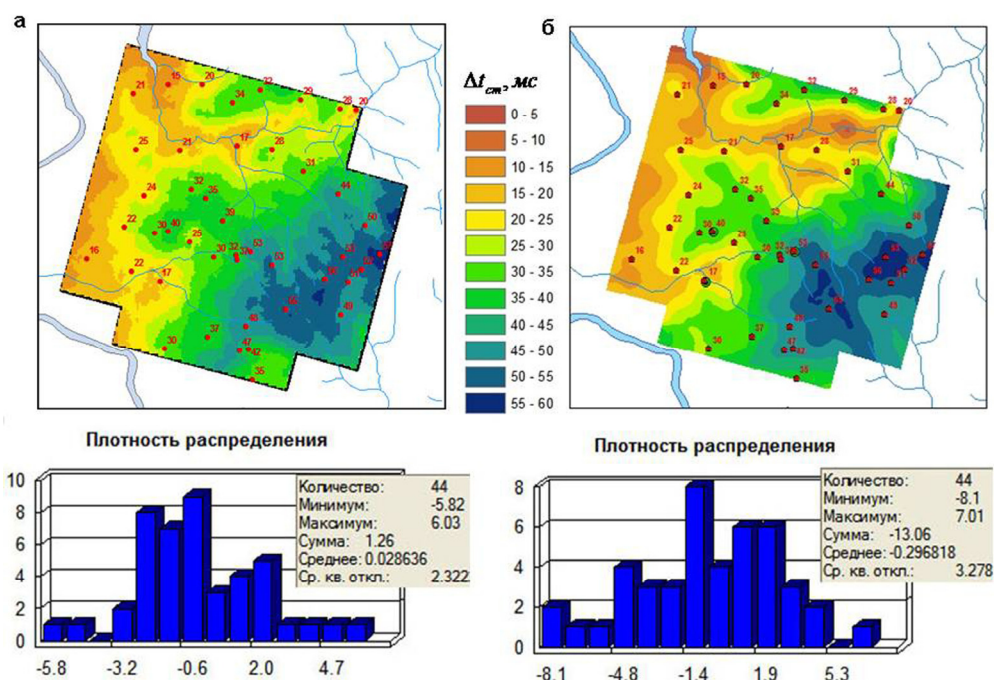


Рис. 6. Карты статических поправок и гистограммы распределения погрешностей определения поправок в точках МСК, полученные по комплексу геофизических методов (а) и по материалам площадных наблюдений в комплексе Millennium (б)

Заключение

Таким образом, задача учета влияния неоднородностей верхней части разреза при площадных геофизических работах может быть в той или иной степени решена при комплексировании методов с использованием современных геоинформационных технологий и комплексов специализированных программ обработки и интерпретации геофизических данных.

Библиографический список

1. Гаченко С. В. Оптимизация статических поправок при проведении сейсмических исследований / С. В. Гаченко, Н. К. Иванов, М. М. Мандельбаум // Технологии сейсморазведки. – 2006. – № 3. – С. 47–50.
2. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке / В. С. Козырев, А. П. Жуков, И. П. Коротков, А. А. Жуков, М. Б. Шнеерсон. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2003. – 227 с.
3. Бычков С. Г. Определение статических поправок по сейсмическим и гравиметрическим данным / С. Г. Бычков, И. Ю. Митюнина // Нефть. Газ. Новации. – 2011. – № 4. – С. 27–33.
4. Бычков С. Г. Технология определения статических поправок по гравиметрическим данным / С. Г. Бычков // Геофизика. – 2009. – № 3. – С. 65–68.
5. Bychkov S. Near-surface correction on seismic and gravity data / S. Bychkov, I. Mityunina // Journal of Earth Science. – 2015. – Vol. 26. – No. 6. – P. 851–857.
6. Кочнев В. А. Возможности гравиметрии и магнитометрии при интерпретации сейсмических данных / В. А. Кочнев, И. В. Гоз // Геофизика. – 2005. – № 4. – С. 28–32.
7. Near surface solutions in South Rub Al-Khali, Saudi Arabia applying seismic-gravity joint inversion and redatuming / D. Colombo, M. Mantovani, M. Sfolciaghi, P. van Mastriht, A. Al-Dulaijan, T. Nafie // First break. – 2010. – Vol. 28. – P. 77–84.
8. Степанов Ю. И. Применение электроразведки при изучении ВЧР при сейсмических работах / Ю. И. Степанов, В. А. Поносов // Геофизические методы поисков и разведки. – Пермь : ПГУ, 1983. – С. 121–124.
9. Михеев С. И. Применение малоглубинной электроразведки для определения статических поправок / С. И. Михеев, В. А. Селезнев // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2015. – № 2. – С. 30–40.
10. Вахромеев Г. С. Моделирование в разведочной геофизике / Г. С. Вахромеев, А. Ю. Давыденко. – М. : Недра, 1987. – 192 с.
11. Митюнина И. Ю. Первые волны на сейсмограммах МОВ и изучение верхней части разреза / И. Ю. Митюнина, Б. А. Спасский, А. П. Лаптев // Геофизика. – 2003. – № 5. – С. 5–12.
12. Бычков С. Г. Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии / С. Г. Бычков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2010. – 187 с.



УДК 551.1

С. В. Снопков¹

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПАМЯТНИКОВ ДРЕВНЕЙ МЕТАЛЛУРГИИ ПРИОЛЬХОНЬЯ

Аннотация. В статье описан опыт применения геофизических и геохимических методов разведки при изучении памятников древней металлургии железа на западном побережье Байкала, использованных при поиске и реконструкции железовосстановительных горнов, при анализе продуктов металлургического процесса и железных руд.

Ключевые слова: древние металлургические центры, железовосстановительные сыродутные горны, железные руды, геофизические методы разведки, магниторазведка, химический анализ металлургических шлаков и руд.

Об авторе:

¹ К. з.-м. н., методист ГБУ ДО «Центр развития дополнительного образования детей», доцент ИГУ, Иркутск, snopkov_serg@mail.ru.

S. V. Snopkov

USE OF GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL METHODS IN THE STUDY OF THE MONUMENTS OF ANCIENT METALLURGY OF OLGHON REGION

Abstract. *The article describes the experience of geophysical and geochemical exploration methods use in the study of the monuments of ancient metallurgy of iron on the west coast of Lake Baikal, used to search for and reconstruct horns, when analyzing the products of metallurgical process and iron ore.*

Keywords: *ancient metallurgical centers, horns, iron ore, geophysical methods of prospecting, magnetic prospecting, chemical analysis of metallurgical slags and ores.*

С древнейших времен для получения железа люди использовали железовосстановительные сыродутные горны, конструкции которых могли значительно отличаться, но технологический процесс получения и обработки железа, в целом, был однотипным. Исследования масштабов и технологии получения железа древними жителями Прибайкалья является одним из важнейших вопросов древней истории региона. Наиболее высокая концентрация следов железоделательной деятельности обнаружена на западном побережье Малого моря (пролив Байкала, Приольхонье). Здесь на участке побережья Байкала протяженностью около 40 км обнаружены десятки мест, где в древности происходило получение и обработка железа [3].

По результатам археологических работ было выявлено, что в древности в Приольхонье использовалось несколько типов железовосстановительных горнов. Наиболее древними (конец I тыс. до н. э. – начало I тыс. н. э.) являются ямные горны, рабочие камеры которых сооружались в грунте на краю искусственной предгорновой ямы. Рабочие камеры этих горнов имеют уникальную воронкообразную форму, напоминающую перевернутую наклонную треугольную пирамиду, глубиной до 1,5 м. Кроме воронкообразных горнов, были обнаружены горны, представляющие собой две полусферические ямы, соединенные подземным каналом на уровне дна ям (подобно сегменту «бублика», тора) и предположительно являющиеся кузнечными. Воронкообразные и тороидальные горны нередко встречаются в пределах одного металлургического центра [2, 3]. В 2015 г. были обнаружены горны, рабочая камера которых имеет коробообразную форму. Стенки рабочей камеры сделаны из каменных плит. Возраст подобных горнов предположительно оценивается средневековьем.

Наиболее эффективным методом обнаружения и предварительной реконструкции металлургических центров является геофизический метод магниторазведка. Благоприятными предпосылками для использования этого метода являются контрастно высокие магнитные свойства артефактов металлургической деятельности относительно вмещающих грунтов. Значения магнитной восприимчивости шлаков и обожженной обмазки (0,13–70 милиЕд. СИ) значительно отличаются от значений грунтов (менее 0,07 милиЕд. СИ). Наиболее высокие амплитуды приращения напряженности магнитного поля дают обожженные стенки горна (70–300 нТл) [1, 3].

Многолетний опыт исследования металлургических центров позволил сформировать методику исследований: площадная съемка по квадратной сети с шагом 0,5 см при

высоте расположения измерительного датчика – 0,5 см, с использованием магнитовариационной станции. Магнитометрическая съемка проводилась с помощью геофизического протонного магнитометра ММП-203 [3].

Основным преимуществом магниторазведки является возможность опосредованного поиска большой территории. Это принципиально важно потому, что участки, где на поверхности встречаются следы металлургического процесса, составляют от 200 до 2000 м². Изучение таких площадей только раскопными работами сопряжено с большими трудностями.

На плане изолиний магнитного поля, как правило, выделяются несколько типов аномалий. Это разнообразной (от изометричной до сложной вытянутой) формы низкоамплитудные (20–40 нТл) аномалии, оконтуривающие металлургический центр, включающий пригоновую яму и горны. Подобные аномалии имеют размеры от 5 до 15 м. Другим типом возмущений магнитного поля являются локальные, слегка вытянутые, аномалии. Амплитуда подобных аномалий изменяется от 60 до 250 нТл, а размер – от 1 до 2,5 м. Интерпретация результатов позволила сделать вывод о том, что локальные аномалии соответствуют расположению сыродутных железобойных горнов. В границах разных металлургических центров выделено от 2 до 9 локальных аномалий, интерпретируемых как горны [2, 3].

Детальная магнитная съемка на участках обнаружения следов деятельности древних металлургов позволила сделать первичную реконструкцию (расположение предгорной ямы и горнов, скоплений руды, шлаков и обмазки и др.) для 13 металлургических центров. Проведенные раскопки на археологических памятниках «Барун-хал-2», «Барун-хал-3», «Курминское озеро – 1», «Курминское озеро – 2», «Курма-28», «Онтхэ-2» подтвердили правильность проведенных реконструкций [2, 3].

Другой важной задачей при исследованиях древних технологий получения железа является изучение железных руд и продуктов металлургического процесса. В Приольхонье выявлено несколько типов железных руд. Наиболее распространенным типом железных руд являются бурые железняки, приуроченные к контактам гнейсов с кристаллическими известняками Ольхонской серии. Оруденение связано с инфильтрацией гидротермальных растворов в проницаемые зоны дробления и трещиноватости. На этих же территориях встречаются фрагменты позднемел-палеогеновой коры выветривания, в которых инфильтрационные руды преобразованы в горизонтальные залежи бурых железняков либо россыпи бурожелезняковой гальки. Другим возможным рудным источником являются ожелезненные гнейсы Иликтинской свиты раннего протерозоя, обнажающиеся на склоне Приморского хребта. Гнейсы обогащены магнетитом, некоторые образцы имеют магнитную восприимчивость до 200 миллЕд. СИ и содержание железа до 55 %. Площадная магнитная съемка позволяет выявлять как зоны инфильтрационного оруденения в гнейсах Ольхонской серии, так и рудные пропластки в гнейсах Иликтинской свиты [1].

Интересные данные были получены при проведении химического анализа образцов руд и шлаков с различных археологических участков. Исследования были выполнены специалистами Лаборатории изотопии и геохронологии Института земной коры СО РАН (Иркутск) с помощью масс-спектрометра Agilent 7500сe. Сравнение микроэлементного состава основных наиболее распространенных на территории руд выявило их значительные отличия. Если для бурых железняков характерно повышенное содержание переходных металлов Cu, Mo, Ni, Zn, а также U, то для гнейсов наблюдается повышенное содержание: щелочных (Rb, Cs, K), щелочноземельных (Sr, Ba), легких (Ga, Sn, Pb, Tl), легких редкоземельных (La, Ce, Nd) и переходных (W, Ti, Nb, Ta) металлов, а также Th.

Сравнение химического состава металлургических железосиликатных шлаков с разных участков также выявило определенные различия. Шлаки центрального и север-

ного побережья пролива Малое море Байкала (местность Курма и др.) оказались по микроэлементному составу подобны ожелезненным гнейсам Иликтинской свиты, а вот шлаки южной части побережья Малого моря – близки к бурым железнякам, распространенным по гнейсам Ольхонской серии. Полученные данные свидетельствуют о том, что древние жители Приольхонья знали и использовали различные типы руд, присутствующие в данном районе.

Таким образом, геофизические и геохимические методы являются эффективными методами при изучении металлургических центров Прибайкалья и позволяют не только обнаруживать и реконструировать их, но и проводить исследования сырьевой базы и продуктов металлургического процесса.

Библиографический список

1. Снопков С. В. Источники руды для производства железа в древности: Курминский археологический участок / С. В. Снопков, Г. Г. Матасова, А. Ю. Казанский, А. В. Харинский, Н. О. Кожевников // Известия Лаборатории древних технологий. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2012. – Вып. 9. – С. 10–30.
2. Снопков С. В. Металлургические горны Приольхонья / С. В. Снопков, А. В. Харинский // Древние культуры Монголии и Байкальской Сибири : материалы III Международной научной конференции (Улан-Батор, 5–9 сентября 2012 г.). – Улан-Батор : Изд-во Монг. гос. ун-та, 2012. – Вып. 3. – С. 241–246.
3. Харинский А. В. Производство железа населением Приольхонья в елгинское время / А. В. Харинский, С. В. Снопков // Известия Лаборатории древних технологий. – Иркутск, 2004. – Вып. 2. – С. 167–187.



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.

Введение

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

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. Подписуемая 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 подписуемые подписи должны быть выполнены шрифтом Times New Roman, 10 pt, полужирным. Точка в конце подписуемой подписи не ставится. На все рисунки в тексте должны быть ссылки (рис. 1).

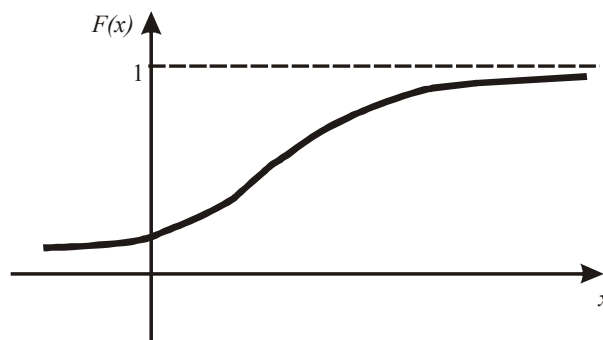


Рис. 1. График $F(x)$ для непрерывной СВ

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

2. Формулы

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

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

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

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

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

Отметим, что размер и начертание математических символов внутри выключенных и строчных формул, на рисунках и подписуемых 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

№ 4 (12)
2016

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор *А. П. Хоменко*

Ответственный за выпуск *Е. М. Лыткина*

Сдано в набор 10.12.2016. Подписано в печать 20.01.2017. Дата выхода в свет
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,5.
Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 100 экз. Заказ №
Цена свободная

ISSN 2308-6335

Зарегистрировано в Роскомнадзоре, свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66108

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