

УДК 550.837.75

## СПОСОБ 3D ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2012 Н.М. Кузнецов

ООО «Радионда», Москва, 121614; e-mail: n.kuznetsov@radionda.ru

В статье рассматривается 3D алгоритм обработки данных радиоволновых исследований межскважинного пространства, который позволяет объединить все полученные на месторождении сечения радиопросвечивания и построить детальную 3D геоэлектрическую карту. Для разработки алгоритма использованы результаты физического моделирования в баке с электролитом. Приведены примеры практической реализации 3D обработки данных на золото-медном и урановом месторождениях.

*Ключевые слова:* радиоволновое просвечивание, томография, 3D обработка, скважина, радиоволновая геоинтроскопия.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с увеличением глубины поисково-разведочных работ на рудных месторождениях, значительно возросла роль скважинных геофизических методов. К таким методам относится метод радиоволнового просвечивания (РВП), отличающийся высокой эффективностью при поиске электроконтрастных рудных объектов (Руководство..., 1977).

В основе метода лежит зависимость прохождения радиоволн от электромагнитных свойств среды: породы низкого электрического сопротивления сильнее поглощают радиоволны, что обеспечивает возможность по измеренному ослаблению поля выявлять проводящие рудные объекты.

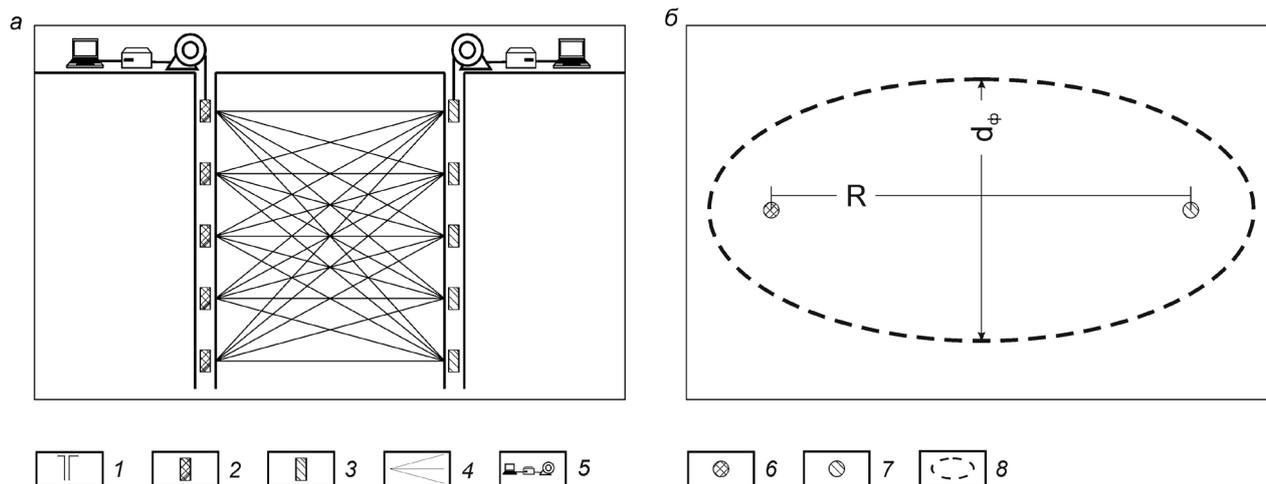
При радиоволновом просвечивании, измерения осуществляются по веерной схеме (рис. 1а), что позволяет многократно «просветить» межскважинное пространство под разными углами. В основе стандартной обработки данных РВП лежит представление о лучевом прямолинейном распространении электромагнитных волн (Даев, 1959; Петровский А.А. и др., 1947), а в качестве параметра интерперетации применяется, введенный А.Д. Петровским, относительный параметр — «коэффициент экранирования»  $\mathcal{E} = E_{норм}/E_{изм}$  (Петровский, 1971). На этой основе в 70-90-е годы XX в. были разработаны различные способы обработки РВП: «радиотени», «засечек»

(Руководство..., 1977); «обобщенной плоскости», «наименьших экранирующих площадей», (Патент..., 1993). Все эти способы позволяли выявлять и локализовать электропроводящие рудные тела (экранирующие объекты) в плоскости сечения двух скважин.

Развитие компьютерной техники открыло возможности для разработки алгоритмов и программ томографической обработки данных просвечивания (Дайнс, Лайтл, 1979), в основе которых лежит дискретная аппроксимация изучаемого объекта и решение системы алгебраических уравнений.

В качестве физического параметра в этих алгоритмах использовалось значение «кажущегося коэффициента поглощения радиоволн», а в последующем — расчетное значение частотно-независимого параметра — эффективного электрического сопротивления. Это позволило строить геоэлектрические разрезы, характеризующие уже не только рудные объекты, но и вмещающие породы.

Радиопросвечивание на рудных месторождениях проводится в скважинах, пробуренных по заданной сети (Методические ..., 2007). В результате создается большое количество отдельно обработанных сечений (2D геоэлектрических разрезов между двумя скважинами), которые достаточно сложно объединить между собой и использовать для подсчета запасов. Поэтому актуальной стала задача физически обосновать



**Рис. 1.** Схема исследования межскважинного пространства методом РВП в разрезе (а) и в плане (б): 1 – скважина; 2 – пункты расположения передатчика; 3 – пункты расположения приемника; 4 – лучи просвечивания; 5 – регистрирующая аппаратура; 6 – передатчик; 7 – приемник; 8 – проекция зоны Френеля на горизонтальную плоскость;  $d_{\Phi}$  – диаметр зоны Френеля; R – расстояние между передатчиком и приемником.

ванной и математически правильной объемной интерполяции всех полученных данных межскважинного просвечивания.

### РАДИОВОЛНОВАЯ ГЕОИНТРОСКОПИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Для решения этой задачи в ООО «Радионда» была разработана технология радиоволновой геоинтроскопии горных пород (РВГИ), в основе которой лежит применение современной высокочувствительной аппаратуры с управляемыми скважинными излучателем и приемником, специальная методика измерений и постоянно совершенствующиеся алгоритмы и программы 3D обработки (Истратов и др., 2000; Истратов и др., 2006; Istratov, Frolov, 2003). При обработке данных РВГИ все пространство месторождения, исследованное радиоволновым методом, математически разбивается на прямоугольные ячейки заданного размера. Целью обработки является определение эффективного электрического сопротивления каждой ячейки.

Известно, что на распространение электромагнитной волны влияют не только породы, лежащие непосредственно на линии передатчик-приемник, но и породы, лежащие в стороне, в пределах зоны существенной для распространения радиоволн (зона Френеля) (Фейнберг, 1999). При каждом положении излучателя и приемника измеренное значение поля определяется эффективным сопротивлением  $\rho_{эф}$  всех ячеек, расположенных в этой зоне. Вклад ячеек в измеренное поле не одинаков. Ясно, что низкоомный объект, находящийся на оси зоны существенной для распространения радиоволн, сильнее ослабляет поле по сравнению с объектом находящимся на ее периферии.

Для определения количественной зависимости вклада элементарной ячейки от ее пространственного расположения относительно точек излучения и приема было проведено физическое моделирование в баке с электролитом. При этом предполагалось, что вклад ячейки можно оценить аномальным полем пробного объекта малого размера, размещенного в данной точке пространства.

Работы проводились совместно со специалистами ООО «Тулский Геофизический Центр» в специальном баке размером 3.5×2.5×2.8 м, заполненном соевым раствором с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м, которые для этого изготовили специальную миниатюрную аппаратуру с дипольными антеннами. Излучающие и приемные диполи располагались вертикально, в средней части бака, на фиксированном расстоянии 1.4 м друг от друга. Измерения проводилось на частоте 31 МГц (длина волны  $\lambda \approx 1.02$  м).

В качестве модели электропроводящего аномального объекта был использован цилиндр, изготовленный из ионообменной пленки диаметром 15, высотой 120 см и заполненный соевым раствором сопротивлением 0.1 Ом·м. Цилиндр располагался параллельно передающей и приемной антеннам, при этом центры цилиндра и антенн находились на одной глубине.

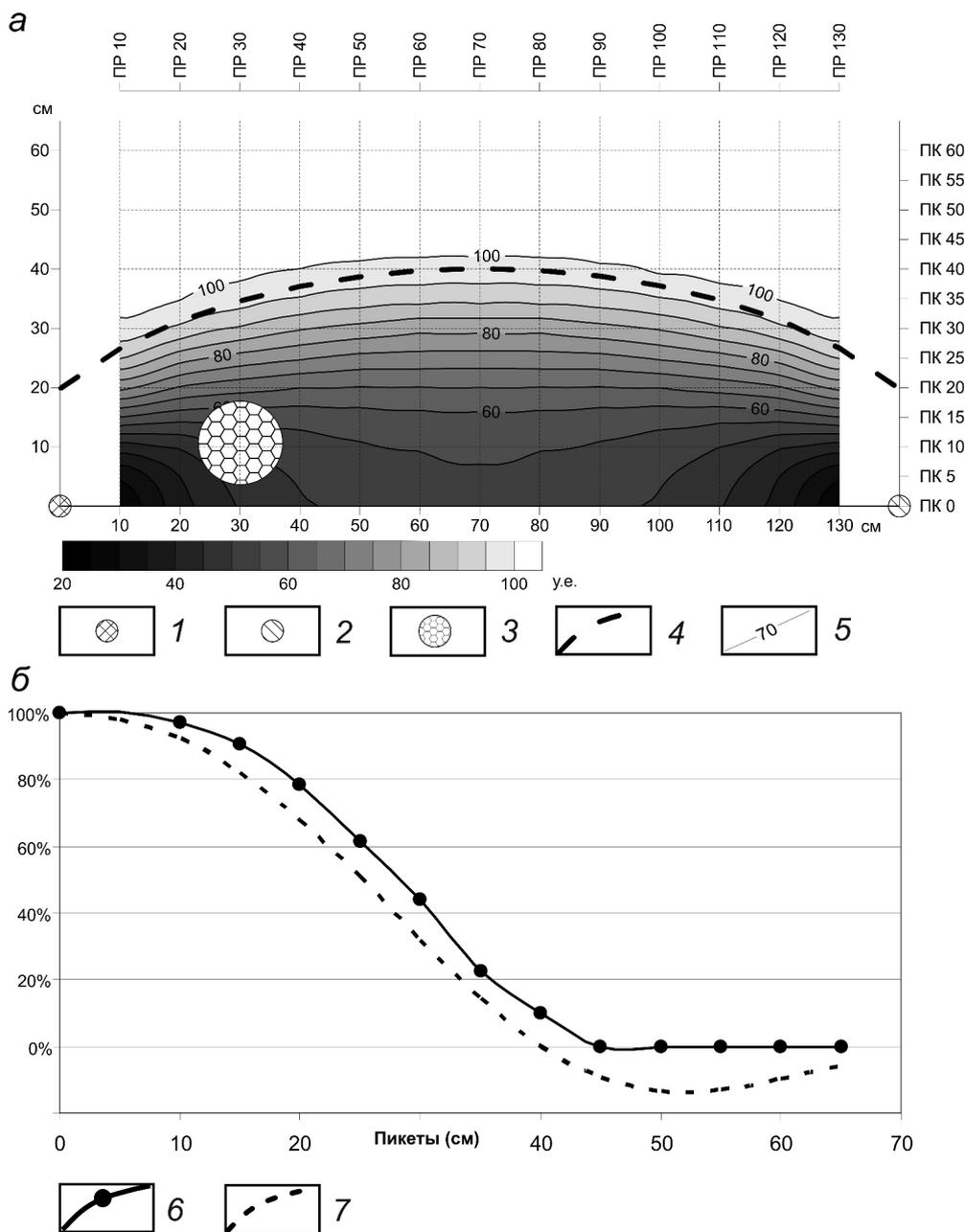
В процессе измерений модель перемещалась в горизонтальной плоскости по сети профилей (шаг 10 см) и пикетов (шаг 5 см) (рис. 2а) и при каждом положении модели приемником регистрировалась напряженность электромагнитного поля.

В начале были проведены измерения нормального поля  $E^{норм}$  (в отсутствии цилиндра), уровень которого составил 100 условных единиц.

Рассмотрим диаграмму на рисунке 2а. При расположении цилиндра на линии передатчик-приемник наблюдается самый низкий уровень поля, на максимальном удалении от линии передатчик-приемник уровень поля соответствует уровню нормального поля (в отсутствии модели). Таким образом, на больших расстояниях влияние цилиндра не сказывается, изолиния со значением 100 у.е. (уровень нормального поля) ограничивает зону, за пределами которой аномальный объект уже не влияет на измеряемое поле  $E^{изм}$ . Эта граница практически совпадает с расчетным значением

первой зоны Френеля, а небольшое различие объясняется конечным диаметром цилиндра. Локальные минимумы вблизи точек излучения и приема связаны с уменьшением поперечного сечения зоны существенной для распространения радиоволн и, соответственно, увеличением относительного перекрытия ее аномальным объектом, то есть конечными размерами цилиндра.

Рассмотрим изменение аномального поля вдоль профиля «70 см», расположенного на середине расстояния передатчик – приемник (рис. 2б), где влияние размера цилиндра мини-



**Рис. 2.** Результаты физического моделирования. Диаграмма зависимости уровня поля от положения аномального объекта (а) и график относительного изменения аномалии в зависимости от расстояния от линии передатчик-приемник (б): 1 – передатчик; 2 – приемник; 3 – модель – цилиндр диаметром 15 см; 4 – граница зоны Френеля; 5 – изолиния уровня поля; 6 – весовая функция по данным моделирования; 7 – весовая функция по теоретическим расчетам.

мально, и основную роль играет его удаление от линии передатчик-приемник. Для определения весового вклада ячейки используется весовая функция  $f(x) = \frac{E^{норм} - E^{изм}_x}{E^{норм} - E^{изм}_0}$ , в которой все значения поля являются измеренными при моделировании. Нормирование производится для того, чтобы исключить влияние конкретных параметров цилиндра, так как значение поля  $E^{изм}_0$  на линии передатчик-приемник определяется диаметром цилиндра и его сопротивлением.

Весовая функция вклада также может быть рассчитана из представления, что радиоволна, прошедшая от передатчика к приемнику по ломаному пути через конкретную ячейку, имеет дополнительное затухание и набег фазы по сравнению с волной по прямому лучу<sup>1</sup>. Как показано на рисунке 2б, характер изменения графиков весовой функции по данным моделирования и по теоретическим расчетам аналогичен. Разница между ними объясняется конечным размером модели. Поэтому проведенные вычисления можно использовать для определения веса ячеек, лежащих в стороне от луча просвечивания, но оказывающих влияние на измеренное поле.

Условия конкретного моделирования не являются случайными. По критериям электромагнитного подобия (Даев, 1958) они соответствуют широкому классу реальных полевых условий:

– поиск сульфидных руд в вулканогенных вмещающих породах, при расстояниях между скважинами 100-140 м;

– поиск алмазонасных трубок в мерзлых известняках при расстоянии между скважинами 400 м.

Для расширения области применения полученных выводов, моделирование также было проведено на других частотах, при других расстояниях между передатчиком и приемником, с другими размерами модели и ее электрическим сопротивлением.

При обработке данных РВГИ каждый луч характеризуется значением кажущегося электрического сопротивления, рассчитанным из кажущегося коэффициента поглощения. Зная геометрию установки и параметры излучателя, из измеренного поля легко определяется кажущийся коэффициент поглощения. Каждая ячейка может оказывать влияние на несколько лучей. Расчет значения  $\rho_{эф}$  для ячейки происходит по формуле:

$$\bar{\rho}_{эф} = \frac{\sum_i \rho_i \cdot \omega_i}{\sum_i \omega_i},$$

где,  $\rho_i$  – кажущееся электрическое сопротивление

<sup>1</sup>Строгое математическое решение для веса каждой ячейки можно получить на основе принципа Гюйгенса, оно сводится к сложному интегральному преобразованию (Фейнберг, 1999)

ние,  $\omega_i$  – вес ячейки  $i$ -ого луча (рис. 3). Данная процедура проводится для всех ячеек исследуемого объема. В результате образуется 3D геоэлектрическая карта месторождения.

Для подтверждения правомерности использования предлагаемого способа 3D обработки проведем сравнение с результатами, полученными с помощью известного 2D томографического метода (Дайнс, Лайтл, 1979) в идентичных условиях. Для этого рассмотрим результаты обработки данных РВГИ на золото-медном месторождении Лобаш-1 (Карелия) (рис. 4), выполненные двумя способами: с применением 2D (томографического) и 3D алгоритмов (рис. 5а, 5б) на одном профиле (Кузнецов, 2008).

Золотомедное месторождение Лобаш-1 относится к сульфидному типу. Месторождения сложено древними породами архей-протерозойского возраста, является частью кварцево-рудного штокверка зонального строения. Площадь ме-

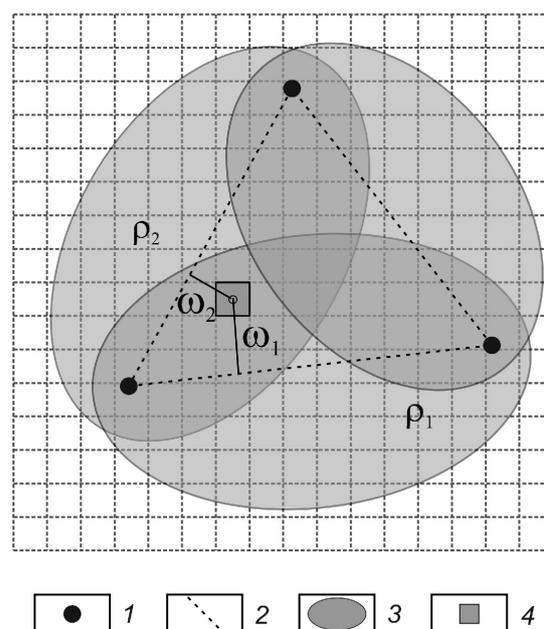


Рис. 3. Схема интерполяции данных радиоволнового метода в плане при 3D обработке: 1 – точки излучения, приема; 2 – луч просвечивания; 3 – проекция зоны Френеля на горизонтальную плоскость; 4 – ячейка пространства.

сторождения составляет ~ 1 км<sup>2</sup>. Глубина рудных подсечений колеблется от 50 до 250 м. Для разведки месторождения была разбурена сеть с шагом между профилями и скважинами от 80 до 150 м.

В результате проведения РВГИ установлено, что оба способа обработки дают близкое распределение электрического сопротивления в разрезе между скважинами, поэтому использование для интерпретации разработанного объемного алгоритма является правомерным.

К преимуществам 3D метода, обосновывающим необходимость его применения, относится



**Рис. 4.** Местоположение исследованных месторождений: 1 – золото-медное месторождение Лобаш-1; 2 – месторождение урана в южном Казахстане.

обработка всех данных по месторождению и создание 3-х мерной матрицы значений  $\rho_{эф}$ , что обеспечивает полноту исследования межскважинного пространства и позволяет построить любое произвольное сечение, в том числе и горизонтальные сечения на заданной глубине (погоризонтные планы) (рис. 6), что является основным достоинством разработанного алгоритма.

Рассмотрим результаты экспериментального опробования алгоритма 3D обработки в горизонтально-слоистых средах, на примере радиоволнового просвечивания инфильтрационного месторождения урана в Южном Казахстане (рис. 4). Основное оруденение на данном месторождении связано с горизонтом, сложенным песчано-глинистым аллювием. Продуктивный пласт расположен на глубине 180 м и имеет мощность 6-10 м. Наибольшими электрическими сопротивлениями 10-12 Ом·м в продуктивном горизонте по данным каротажа обладают гравийно-песчаные отложения, наименьшими 4 Ом·м – глины. Месторождение разбуривается технологическими скважинами по гексагональной сети с расстоянием между скважинами от 40 до 60 м.

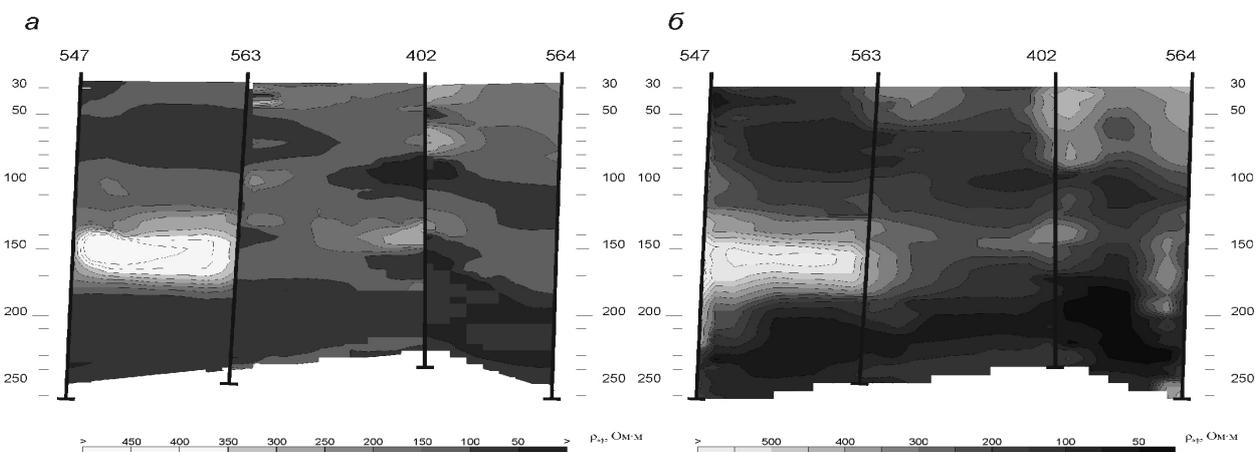
Одной из решаемых задач геофизическими методами на месторождениях подобного типа, является выделение и корреляция интервалов проницаемых пород в песчано-глинистых отложениях. В работах (Истратов и др., 2009; Истратов и др., 2010) показано, что контрастность электрических характеристик пород разреза позволяет эффективно использовать для решения этой задачи технологию РВГИ.

На рис. 7 приведен фрагмент 3D геоэлектрической карты – горизонтальный план на глубине 180 м, где прослеживаются низкоомные зоны северо-восточного простирания, представленные участками с повышенной глинистостью, которые в свою очередь являются препятствием для распространения технологических растворов. Данная интерпретация 3D геоэлектрической карты РВГИ была сопоставлена с картой фактических дебитов скважин, полученных при пробных откачках. Как показано на рис. 7, где изолинии дебитов нанесены на геоэлектрическую карту, более высоким дебитам отвечают участки более высокого сопротивления, то есть более проницаемые.

На основе дополнительной информации о строении проницаемых зон в межскважинном пространстве, полученной по данным РВГИ, могут быть уточнены извлекаемые запасы и спрогнозирована эффективность отработки исследованного месторождения способом подземного выщелачивания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение зависимости радиоволновых аномалий от положения объекта относительно плоскости просвечивания позволило обосновать правомерность использования представления о зоне Френеля при обработке данных радиоволнового просвечивания и разработать способ количественного расчета весовых коэффициентов для интер-



**Рис. 5.** Геоэлектрические разрезы, полученные в результате 2D томографической обработки (а) и 3D обработки (б) данных межскважинного радиоволнового метода на месторождении Лобаш-1 (Карелия) на профиле по линии скважин 547-563-402-564.

СПОСОБ 3D ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

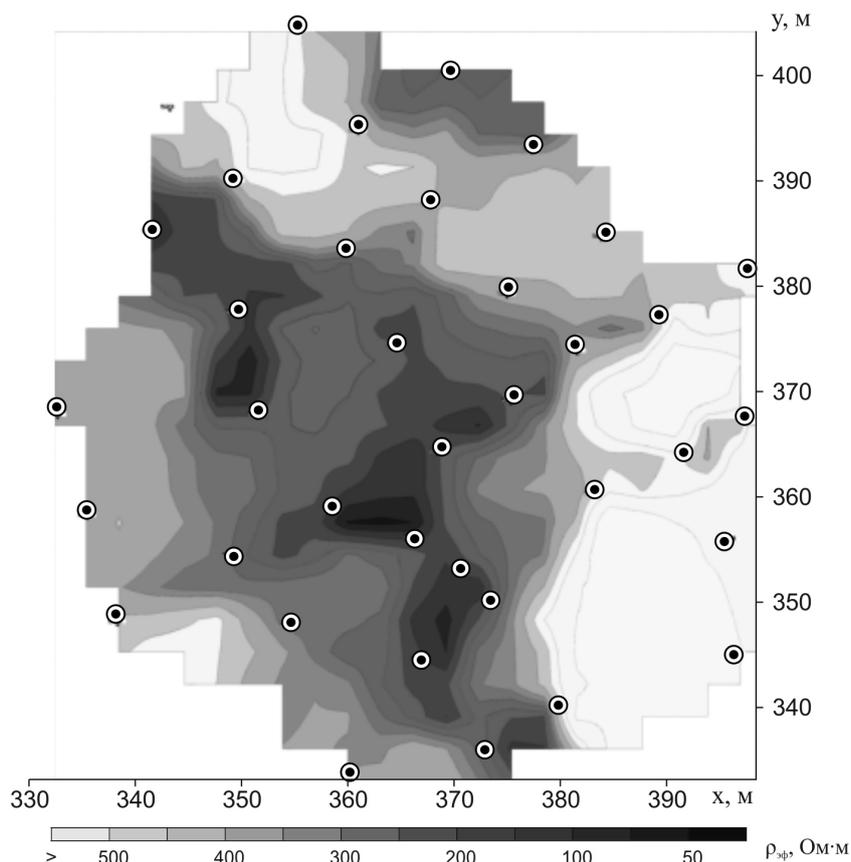


Рис. 6. Фрагмент 3D геоэлектрической карты месторождения Лобаш-1 (Карелия). Горизонтальное сечение на уровне 100 м.

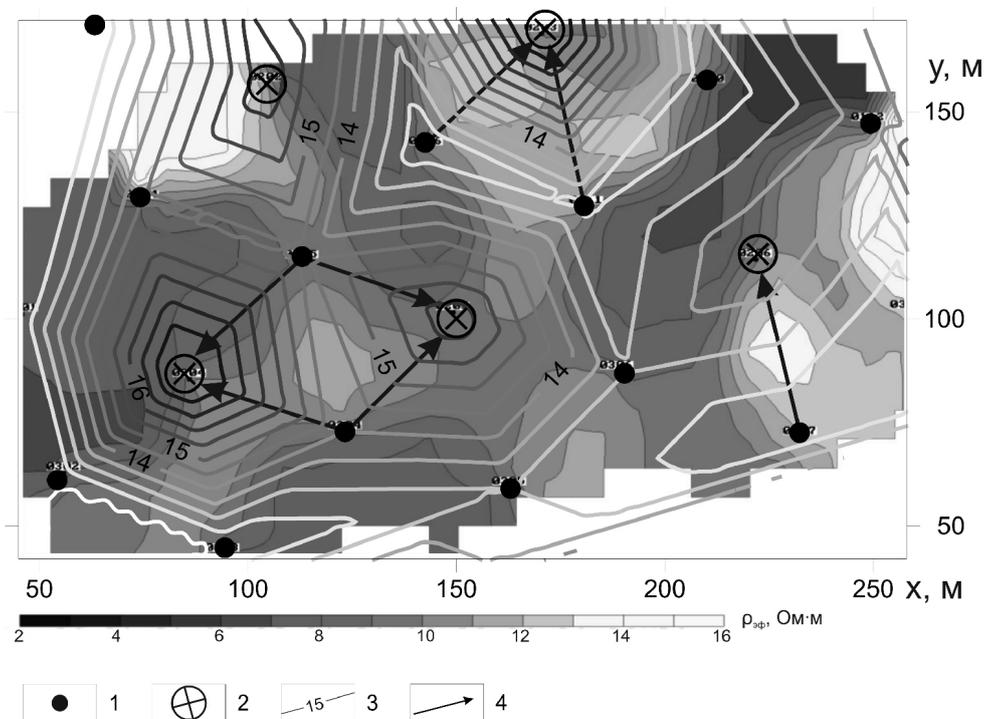


Рис. 7. Сопоставление 3D геоэлектрической карты на глубине 180 м по данным радиоволнового метода с дебитами скважин на незакисленном блоке на месторождении урана в Южном Казахстане: 1 – закачные скважины; 2 – откачные скважины; 3 – изолинии дебитов скважин через  $0.5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4 – направление вероятного распространения технологических растворов по проницаемым породам.

полирования данных в алгоритме 3D обработки.

Сравнение геоэлектрических разрезов, построенных предложенным способом 3D обработки и полученных с помощью томографии (2D), показали, как правомерность использования разработанного алгоритма 3D обработки, так и его существенные преимущества для решения практических поисково-разведочных и технологических задач на рудных месторождениях и технологических блоках урановых месторождений ПВ.

Использование предложенного алгоритма при разведке рудных месторождений позволяет выявить и пространственно представить основные структурные и морфологические особенности залежи, влияющие как на подсчет запасов, так и на выбор способа их обработки.

#### Список литературы

- Даев Д.С.* Моделирование некоторых задач высокочастотной электроразведки // Известия ВУЗов. Геология и разведка 1958. № 4. С. 13-19
- Даев Д.С.* Об обработке и истолкование данных радиоволнового просвечивания // Известия ВУЗов. Геология и разведка 1959. № 6. С. 104-109.
- Дайнс К.А., Лайтл Р.Дж.* Машинная томография в геофизике // Труды ИИЭР. 1979. Т. 67. № 7. С. 103-112.
- Патент России № 2084930 от 22.07.93 / Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания.
- Истратов В.А., Колбенков А.В., Лях Е.В., Перекалин С.О.* Радиоволновой метод мониторинга технологических процессов в межскважинном пространстве // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 59-68
- Истратов В.А., Колбенков А.В., Перекалин С.О., Скринник А.С.* Радиоволновой метод мониторинга процесса подземного выщелачивания на месторождениях урана // Геофизика. 2010. № 4. С. 59-68.
- Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В., Матяшов С.В.* Радиоволновая геоинтроскопия (РВГИ) межскважинного пространства на месторождениях нефти // Геофизика. 2000. Спецвыпуск. С. 59-68.
- Истратов В.А., Скринник А.В., Перекалин С.О.* Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве «РВГИ-2005» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 1. С. 37-43.
- Кузнецов Н.М.* Опыт применения радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства для разведки золотомедного месторождения // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 27-29.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. М.: МПР, 2007, 39 с.
- Петровский А.Д.* Радиоволновые методы в подземной геофизике. М.: Недра, 1971. 290 с.
- Петровский А.А., Достовалов Б.Н.* Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами // Труды института мерзлотоведения АН СССР. 1947. Т. 5. С. 121-160.
- Руководство по радиоволновым методам скважинной и шахтной геофизики // Под ред. А.Д. Петровского и А.А. Попова. М.: Недра, 1977. 335 с.
- Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука-Физматлит, 1999. 496 с.
- Istratov V.A., Frolov A.D.* Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif // J. Geophys. Res. 2003. Planets. V. 108. № E4. 8038. Doi: 10.1029/2002JE0080.

## 3D PROCESSING METHOD OF CROSSHOLE RADIOWAVE INVESTIGATION

**N.M. Kuznetsov**

LLC «Radionda», Moscow, 121614; e-mail: n.kuznetsov@radionda.ru

The paper presents a 3D processing algorithm of crosshole radiowave investigations, which allows combining all obtained radiowave sections of mineral field and creating a detailed 3D geoelectric map. The algorithm was approved by results from physical modeling in the tank filled with salt solution. The paper provides examples of application of 3D radiowave data processing on gold-cooper and uranium fields.

*Keywords: radiowave imaging, tomography, 3D processing, crosshole, radiowave geointroscopy.*