

## **ИЗУЧЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ И МЕТОДИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ПРОЦЕССА КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНОВЫХ РУД**

**Оленченко В.В.<sup>1</sup>, Шеин А.Н.<sup>1</sup>, Камнев Я.К.<sup>1</sup>, Бахарев Ю.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск

<sup>2</sup> – ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение», г. Краснокаменск

В работе оценивается информативность электротомографии при исследовании рудных штабелей в процессе кучного выщелачивания (КВ) урановых руд. Изучены методические особенности работ на штабелях КВ. Показана высокая разрешающая способность метода электротомографии при выделении геоэлектрических неоднородностей в объеме рудного штабеля, а также при оценке качества гидроизоляции основания штабеля. Установлено различие в удельном электрическом сопротивлении материала рудных штабелей, находящихся на разных стадиях выщелачивания и исходной руды.

*Ключевые слова:* кучное выщелачивание, рудный штабель, удельное электрическое сопротивление, электротомография.

В настоящее время контролем кучного выщелачивания геофизическими методами занимаются очень узкий круг организаций, в основном специализирующихся на выщелачивании золота. В большинстве горно-химических организация (в частности в ОАО «ППГХО») опробование рудного материала штабелей кучного выщелачивания (КВ) осуществляется путем ручного отбора проб с поверхности, либо из материала штабеля при шнековом бурении. Для проведения такого опробования требуется демонтаж оросительной системы, шнековое бурение, отбор проб, пробоподготовка и оценка содержания металла химическими либо физическими методами анализа, составление карты опробования с нанесением непроработанных зон штабеля КВ. Затем производится монтаж системы орошения на непроработанные зоны для продолжения процесса выщелачивания. При этом общая продолжительность опробования с учетом всех указанных операций достигает 15-20 суток. Таким образом, возникает необходимость оперативного выявления непроработанных зон в штабеле КВ для организации точечного орошения участков с недоработанной рудной массой.

Анализ литературных источников и Интернет-ресурсов показал, что для решения подобного типа задач наиболее часто применяются электроразведочные методы [1, 2, 3], а среди этих методов наиболее эффективна электротомография. Однако специфика геотехнических условий для проведения электроразведочных исследований на урановом производстве обуславливает необходимость оценки информативности и методических особенностей.

Объект исследований представляет собой рудные штабели, расположенные на территории металлургического завода ОАО «ППГХО». Пять рудных штабелей составляют одну большую насыпь рудного материала размером примерно 500×250 м. Некоторые из штабелей находятся в процессе выщелачивания (орошения), другие в процессе разбора или формирования. То есть, рудный штабель это система с изменяющимися во времени размерами и физическими свойствами. Стоит отметить, что под действием химического и физического выветривания обломки горной породы разрушаются до песка от крупнозернистой до пылеватой фракции. Еще одной особенностью процесса КВ является то, что в процессе выщелачивания концентрация кислоты может меняться (постепенно снижается). Таким образом, непостоянные свойства материала штабелей (дисперсность, кислотность) будут определять изменение электрических свойств среды в процессе выщелачивания.

При работе на штабелях кучного выщелачивания использовался метод электротомографии, который относится к группе методов сопротивления и сочетает в себе элементы вертикального электрического зондирования и профилирования. К настоящему времени аппаратная база и методические аспекты электротомографии хорошо развиты. Seriously проработана теоретическая основа метода, опубликованы методические приемы и созданы программы для многомерного моделирования и инверсии данных [4, 5, 6]. Основным отличием электротомографии от классических вертикальных электрических зондирований является использование многоэлектродных электроразведочных кабелей (кос) и полная автоматизация измерений, которые позволяют использовать в качестве питающих и измерительных электродов одни и те же, расположенные на

профиле, заземления. В качестве измерительного прибора использовалась многоэлектродная электроразведочная станция «Скала-48» [7]. Аппаратура рассчитана на работу с двумя косами, по 24 электрода каждый и может работать в режимах электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации, электропрофилирования и вертикального электрического зондирования. Результаты измерений позволяют получить информацию о распределении кажущегося удельного электрического сопротивления по разрезу. При площадных работах результаты измерений по профилям можно объединить в массив и выполнить трехмерную (3-D) инверсию данных.

Исследования на штабелях проводились в площадном и профильном вариантах. При измерениях использовалась последовательность подключения электродов, соответствующая симметричной установке Шлюмберже. На одном из штабелей выполнены площадные исследования (несколько параллельных профилей с шагом 10 м) с целью построения его трехмерной геоэлектрической модели. Межэлектродный шаг по профилям составлял 5 м.

На рисунке 1 показан разрез удельного электрического сопротивления штабеля и грунтов основания по одному из профилей, пересекающих отработанный рудный штабель. В приповерхностной части штабеля выделяется тонкий слой повышенного (50-100 Ом·м) сопротивления, объясняющийся образованием маловлажной корки при просыхании штабеля. Повышенное УЭС руды отмечается и на откосах штабеля, что может быть связано как с просыханием откосов, так и с меньшей степенью их проработки в процессе выщелачивания.

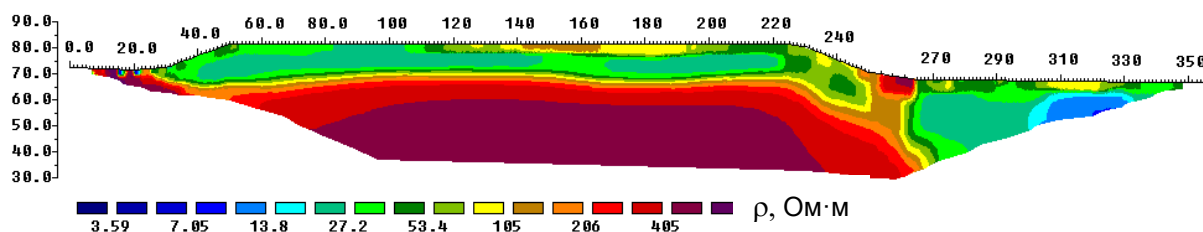


Рис. 1. Разрез удельного электрического сопротивления рудного штабеля.

Низкий уровень УЭС материала штабеля (20-30 Ом·м) вызван как остаточной влажностью, так и его дисперсным составом. В процессе выщелачивания часть исходной горной породы разрушается до песчаной фракции, заполняющей пустоты крупнообломочного материала. Мелкозернистая фракция песка, смоченная раствором серной кислоты, обуславливает уровень УЭС материала штабеля в 20-30 Ом·м.

В основании штабеля (рис. 1), выделяется объект высокого сопротивления (200-800 Ом·м). Это не существующий в реальности высокоомный объект. Он появляется вследствие влияния на распространение тока в среде изолирующего слоя пленки на основе поливинилхлорида (ПВХ). Пленка препятствует проникновению тока на глубину, что дает эффект подстилающего непроводящего слоя на кривых зондирования (рис. 2).

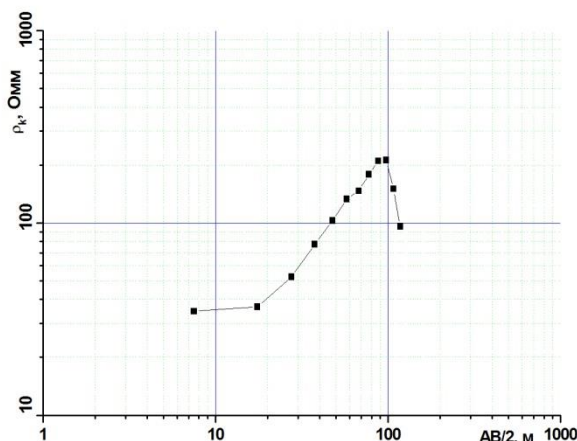


Рис. 2. Типичная кривая ВЭЗ с эффектом непроводящего слоя

Решение обратной задачи в присутствии такого эффекта приводит к появлению на разрезах УЭС на глубине мощного слоя с высоким сопротивлением. На самом деле в основании штабеля залегают четвертичные суглинки, обладающие низким УЭС. Фрагмент разреза пород в естественном залегании виден в окончании профилей (рис. 1, ПК 260-355 м), где УЭС пород составляет 20-30 Ом·м. Таким образом, по данным электрических зондирований можно оценить наличие слоя гидроизоляции в основании штабеля, а также – возможно – качество гидроизоляции. В местах утечки растворов ожидаются аномалии низкого УЭС в основании штабеля.

Двумерные наборы данных по профилям штабеля №4 средствами программы Res2Dinv [6] были преобразованы в трехмерный массив данных. Затем с помощью программы Res3Dinv (Geotomo Software, Малайзия) была выполнена трехмерная инверсия. В объеме штабеля оконтурены области с низким и высоким сопротивлением (Рис. 3). Низкое УЭС может быть связано как с повышенной остаточной влажностью, так и с повышенным содержанием пылеватой фракции в заполнителе (зоны кольматации). Повышение УЭС может быть связано с просыханием или непроработанной зоной. В любом случае природу аномалий повышенного или пониженного УЭС в рудном штабеле можно будет установить только по результатам опробования.

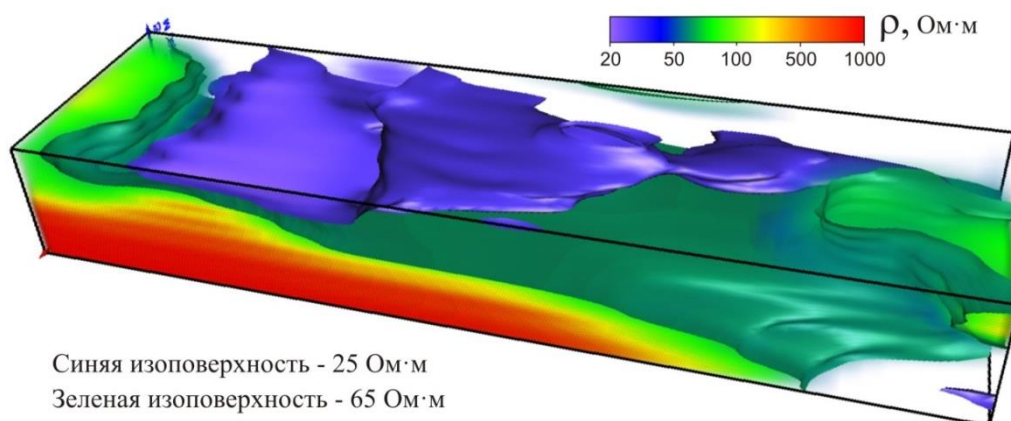


Рис. 3. Трехмерная модель распределения УЭС в рудном штабеле.

Хотя трехмерная визуализация данных электротомографии позволяет наглядно представить положение тех или иных геоэлектрических неоднородностей в объеме рудного штабеля, для привязки аномалий на местности удобнее пользоваться планами изолиний УЭС, представляющими собой срезы трехмерной модели на разных глубинах. С помощью такого среза можно наглядно оценить качество гидроизоляции штабеля. Если гидроизоляция устроена качественно, основание штабеля должно проявляться как однородный слой высокого сопротивления, кровля которого залегает на одном гипсометрическом уровне.

На рис. 4 показан план изолиний УЭС, представляющий срез трехмерной модели по глубине 16-19 м, где на фоне высокого (200-500 Ом·м) сопротивления выделяются участки пониженного УЭС (10-25 Ом·м).

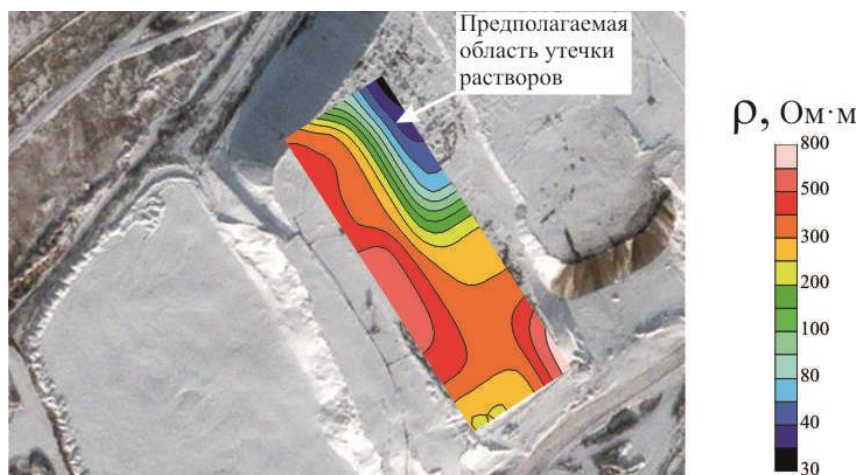


Рис. 4. План изолиний УЭС в штабеле по глубине 16-19 м.

На представленном плане (рис. 4), высокое электрическое сопротивление фона связано с экранирующим влиянием пленки. Аномалия пониженного сопротивления (30-50 Ом·м) может быть вызвана утечками выщелачивающих растворов через слой гидроизоляции. Однако это предположение необходимо проверить дополнительными исследованиями, включающими оконтуривание аномалии по площади после вывоза отработанной руды в отвал и вскрытие этой аномалии шурфами.

Таким образом, в результате исследований штабелей КВ методом электротомографии на предприятии ОАО «ППГХО» установлено следующее:

- метод электротомографии обладает достаточной разрешающей способностью и информативностью при изучении штабелей КВ и может быть использован для контроля процесса кучного выщелачивания урановых руд, а материал штабеля дифференцируется по УЭС в зависимости от влажности и этапа выщелачивания;
- в основании штабеля КВ выделяется ложный объект высокого сопротивления (250-800 и более Ом·м), обусловленный наличием слоя гидроизоляции из пленки ПВХ. По кровле этого слоя можно картировать основание штабеля, а также оценить качество гидроизоляции и определить предполагаемые зоны утечки;
- геоэлектрические условия в пределах штабелей КВ являются благоприятными для электрических зондирований, а методика электротомографии может применяться без каких-либо ограничений с соблюдением техники безопасности при работах на штабелях кучного выщелачивания. При этом объектом исследований могут быть как вновь формируемые, так и орошаемые штабели.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении полевых работ сотрудникам ОАО «ППГХО» зам. директора ЦНИЛ А.В. Тирскому, ведущему инженеру-геофизику И.В. Кутузову, инженеру-геофизику О.В. Лаврентьеву

1. Голищенко Г.Н., Халецкая О.В., Геофизические исследования проницаемости штабелей кучного выщелачивания золота / Горный журнал, 2011, №12. – с. 18-20.
2. Rucker D. Moisture estimation within a mine heap: An application of cokriging with assay data and electrical resistivity // Geophysics, – 2010, – vol. 75, – №1, – p.b11–b23.
3. Rucker, D., Fink J., Loke M. Environmental monitoring of leaks using time-lapsed long electrode electrical resistivity // Journal of Applied Geophysics, – 2011, – vol. 74, – p.242–254.
4. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики, 2006, N02, с. 14–17.
5. Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред // Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ «Геоинформмарк», М., 1996, Выпуск 2, 50 с.
6. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques // Geophysical Prospecting, 1996, N44(3), p. 499–524.
7. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения. URL: <http://www.nemfis.ru/etom.pdf> (дата обращения 25.06.2013)