

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СОЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕХМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ НАЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Белова А.Ю. (ФГБОУ ИРНИТУ, г. Иркутск), Давыденко Ю.А. (ООО «Гелиос», г. Иркутск), Жуков А.А. (ПАО «Уралкалий», г. Березники), Богданович Д.В. (ФГБОУ ИРНИТУ, г. Иркутск), Бухалов С.В. (ООО «Гелиос», г. Иркутск), Шкиря М.С. (ООО «Гелиос», г. Иркутск), Аборнев К.В. (ООО «Гелиос», г. Иркутск)

Аннотация

Применение наземных методов электромагнитного зондирования позволяет оценить геологическую обстановку для обнаружения потенциально опасных низкоомных объектов при инженерно-геологических изысканиях. Высокую эффективность показало применение метода электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП), в котором переходные процессы возбуждаются заземленным диполем и регистрируются приемными линиями. По результатам инверсии в рамках одномерной модели уточнено горизонтально-слоистое строение осадочной толщи над калийным рудником и выделена потенциально опасная область повышенной проводимости. На следующем шаге полученная модель использовалась в качестве начального приближения для трехмерной инверсии переходных процессов, в результате чего положение области повышенной проводимости было уточнено как в плане, так и по глубине.

Введение

Провалы почвы, происходящие в результате затопления калийных шахт, являются актуальной проблемой не только в России, но и за рубежом. К затоплению шахт приводит нарушение целостности водозащитной толщи над выработками, в результате чего, вода пробивает себе дорогу в пространство рудников. В настоящее время для поиска возможных зон нарушения сплошности водозащитной толщи применяются различные методы, в том числе и геофизические. Импульсная электроразведка благоприятна для выделения низкоомных аномалий в высокоомных соляных породах, связанных с обводнением.

Первая крупная авария на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей произошла еще в 1986 году, тогда из-за поступления вод в шахту был потерян рудник БКПРУ-3. Ситуация повторилась в 2006 году на руднике БКПРУ-1. Приток в рудник БКПРУ-1 был зафиксирован еще в 2006 году, а в 2007 году в районе фабрики техсоли, произошел провал над техногенной карстовой полостью. Позже, на площади, занимаемой затопленным рудником, произошли еще четыре провала.

Березники, второй по величине город Пермского края, значительная часть жилой застройки города расположена над шахтными выработками рудника БКПРУ-1. Средняя глубина до выработок от 200 до 350 метров. Третья авария на ВКМКС произошла в 2014 году, провал образовался над шахтным полем рудника СКРУ-2 в городе Соликамске. В настоящее время приток вод контролируется, и рудник продолжает функционировать. Сложившаяся ситуация имеет повышенную техногенную опасность и несет урон для народного хозяйства. Вследствие чего, актуальным стоит не только вопрос мониторинга образования новых провалов, но и сохранности водозащитной толщи над действующими рудниками. Применение технологии электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП) позволяет уточнить геологическое строение разреза и выделить потенциально опасные низкоомные зоны в водозащитной толще.

Метод и теория

В ходе выполнения работ по поиску низкоомной полости, заполненной соляным раствором и оценки состояния водозащитной толщи, в пределах шахтного поля Соликамского калийного рудопроявления № 2 были изучены данные ранее проведенных работ в виде каротажных диаграмм геофизических исследований скважин, данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и сводная стратиграфическая колонка района ВКМКС. В общем комплексе геолого-геофизических методов использовалась технология ЭМЗ-ВП для

детальных площадных работ по исследованию аномальных низкоомных участков, перекрытых высокоомным слоем покровной каменной соли (ПКС). Всего на 8 профилях с шагом 25 м было записано 599 точек зондирования и 61 контрольное измерение, общей протяженностью профилей 7500 м и площадью 0.9 км².

Метод ЭМЗ-ВП – это метод импульсной электроразведки, использующий полную форму переходного процесса, что позволяет перейти от использования кажущихся параметров (кажущееся сопротивление (ρ_k) и кажущаяся поляризуемость (η_k)) к полноценному решению задач одномерной или трехмерной инверсии с учетом частотной дисперсии электропроводности для становления поля горизонтального электрического диполя [1].

В методе ЭМЗ-ВП разрез возбуждается последовательностью разнополярных импульсов с помощью генераторного диполя АВ. На приемных электродах заземленной линии регистрируется полная последовательность импульсов, что позволяет рассчитать переходный процесс на 128 временных задержках, нормированных на разность потенциалов, взятую перед выключением токового импульса. Данный подход существенно повышает информативность традиционных методов постоянного тока и дает возможность более детально изучать литологическое строение разреза. Кроме того, для индукционных токов прозрачны высокоомные экраны: мерзлота, базальты, траппы, в том числе соли и т.д., которые существенно ограничивают область применения методов постоянного тока.

В преддверии полевых опытно-методических работ методом ЭМЗ-ВП на ВКМКС для оценки состояния солевых и надсолевых пород было выполнено опережающее математическое моделирование. Основой данных для моделирования послужила априорная геолого-геофизическая информация по руднику СКРУ-2. Всего предполагалось рассчитать два варианта модели: 1 – проверить наличие рассолонасыщенной зоны, находящейся в солевой толще и имеющей канал, связывающий ее с надсоляными горизонтами; 2 – рассолонасыщенная зона, представляющая собой подземный резервуар и не имеющий канала, связывающего его с надсоляными горизонтами.

Расчет данных моделей осуществлялся с помощью прямой трехмерной задачи в программном комплексе ИТЕМ-IP. Математический аппарат, лежащий в основе этого программного комплекса, представлен в работе [3]. Процесс решения такой задачи представляет собой следующую процедуру. На первом этапе необходимо задать геоэлектрическую модель, определить систему приемников и источников. Построение геоэлектрической модели заключается в задании геометрических параметров объектов с различным удельным электрическим сопротивлением (УЭС). Поляризационные параметры в расчете не использовались, поскольку эффекты ВП практически не оказали существенного влияния на результаты измерений проводящем разрезе в используемом диапазоне регистрации переходных процессов до 125 мс. После этого с учетом мощности и свойств слоев среды формируется объект с заданным шагом по трем измерениям X, Y, Z (в нашем случае это рассолонасыщенная полость). Данный объект служит первым приближением для подбора распределения геоэлектрических свойств среды.

В результате, моделирование показало чувствительность системы к аномалеобразующим объектам в трехмерной горизонтально-слоистой среде. Для полевых работ было рекомендовано использовать как соосную, так и ортогональную установку измерений. За соосную установку принимается такая установка, в которой приемные линии субпараллельны генераторной линии, за ортогональную – в которой приемные линии субперпендикулярны генераторной. Два генераторных диполя, располагались перпендикулярно друг другу и имели одну общую точку А.

В отличие от методов постоянного тока, в методе ЭМЗ-ВП анализируется форма переходных процессов. Поскольку на постоянном токе заданные целевые объекты не регистрируемы, то регистрацию необходимо производить путем анализа поля становления. Регистрируемым считается аномальный сигнал со значением выше 0.01 мВ.

Как известно, все хемогенные осадочные отложения имеют низкое удельное электрическое сопротивление (УЭС) за исключением некоторых солей, в том числе калийных, имеющих высокое УЭС.

С целью оценки чувствительности технологии ЭМЗ-ВП к наличию в разрезе низкоомной области в соляной толще были последовательно выполнены инверсии электромагнитных зондирований в рамках одномерных и трехмерных моделей.

Инверсия данных ЭМЗ-ВП в рамках одномерной горизонтально-слоистой модели выполнялась в программном комплексе «Mars1D» [1]. На первом этапе массовой обработки данных ЭМЗ-ВП выполнен подбор УЭС с помощью применения различных алгоритмов минимизации функционала в многомерном признаковом пространстве [2], при этом

поляризационные параметры были закреплены и не подбирались. Функционал невязки рассчитывался среднеквадратическим и робастным способами.

По результатам моделирования были построены разрезы и карты по УЭС на глубину до 350-400 м. В результате инверсии была уточнена горизонтально-слоистая модель разреза и выделена ослабленная низкоомная зона на 6-ом профиле в интервале глубин 110 – 130 м, связанная с наличием рассолонасыщенной зоны (Рис. 1).

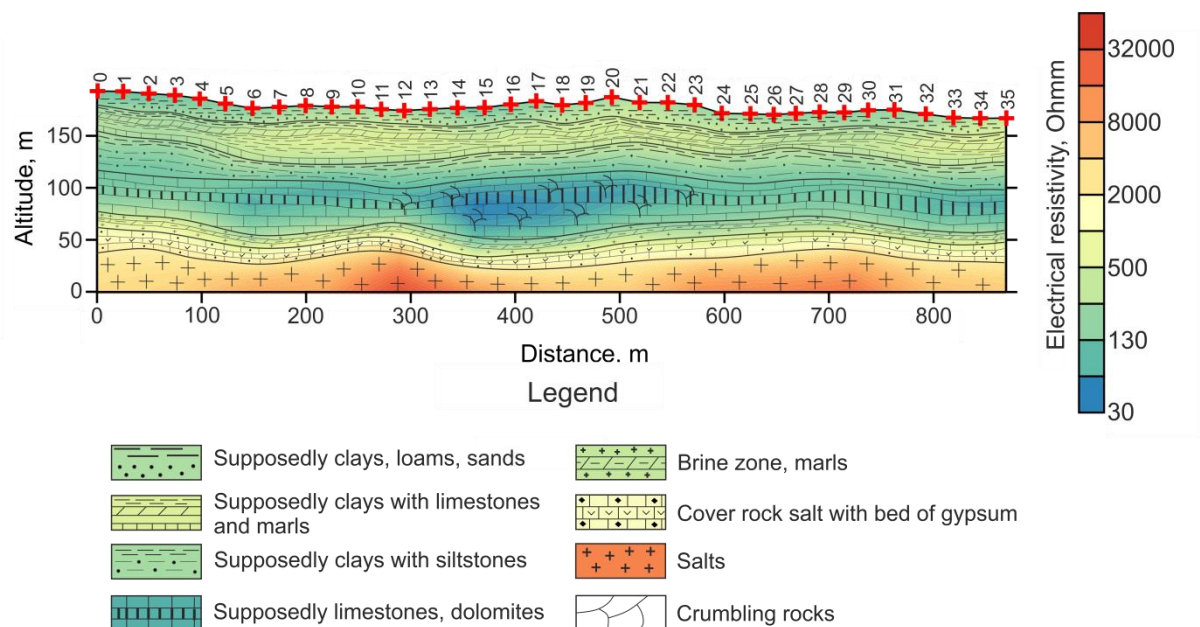


Рисунок 1. Геоэлектрический разрез по 6-ому профилю в пределах шахтного поля вблизи Соликамска

Для учета влияния на качество трехмерной инверсии формы спада импульса при выключении тока в генераторной линии, была произведена оценка различных видов спада токового импульса и расчет невязки между экспериментальными и теоретическими кривыми в программе ИТЕМ-IP.

В ходе моделирования распространения сигнала в среде при наличии спада импульса различной формы была произведена оценка невязки между экспериментальными кривыми и теоретическими кривыми от среды с учетом и без учета импульса для соосной и ортогональной установок. Было установлено, что минимуму невязки соответствует импульс с линейным спадом тока с 1 А до 0 А за период времени с 0.2 мсек до 0.5 мсек (Рис. 2).

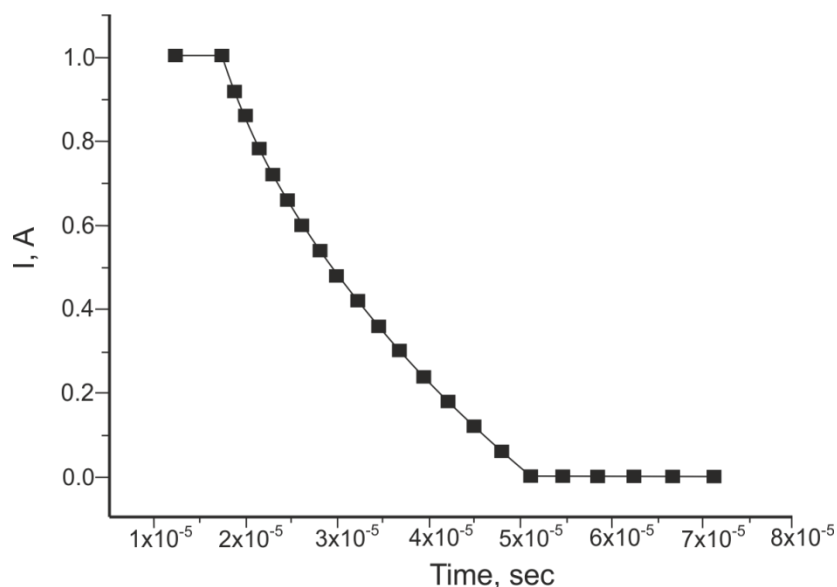


Рисунок 2. Форма спада импульса тока. Амплитуда импульса нормирована на 1 А

На рисунке 3 представлено сравнение теоретических кривых, рассчитанных для однородной среды, с соответствующими экспериментальными кривыми для соосной и ортогональной установок. Высокие значения невязки соответствуют случаю расположения приемников в области аномалеобразующих объектов в верхних слоях среды.

Далее определялись времена, на которых наличие импульса наибольшим образом сказывается на теоретических кривых. Установлено, что влияние учета спада импульса тока в основном сказывается на ранних временах – до 0.7 мсек, что обусловлено эффективным затуханием высокочастотной составляющей импульса в верхних слоях среды. Распределение электромагнитных полей в нижних слоях среды обусловлено преимущественно низкочастотной составляющей импульса. Тем не менее, несмотря на то, что подбор аномалеобразующих объектов в дальнейшем осуществлялся в диапазоне времен от 0.3 до 10-20 мсек, в зависимости от вида установки, учет формы спада импульса был необходим для получения корректного результата.

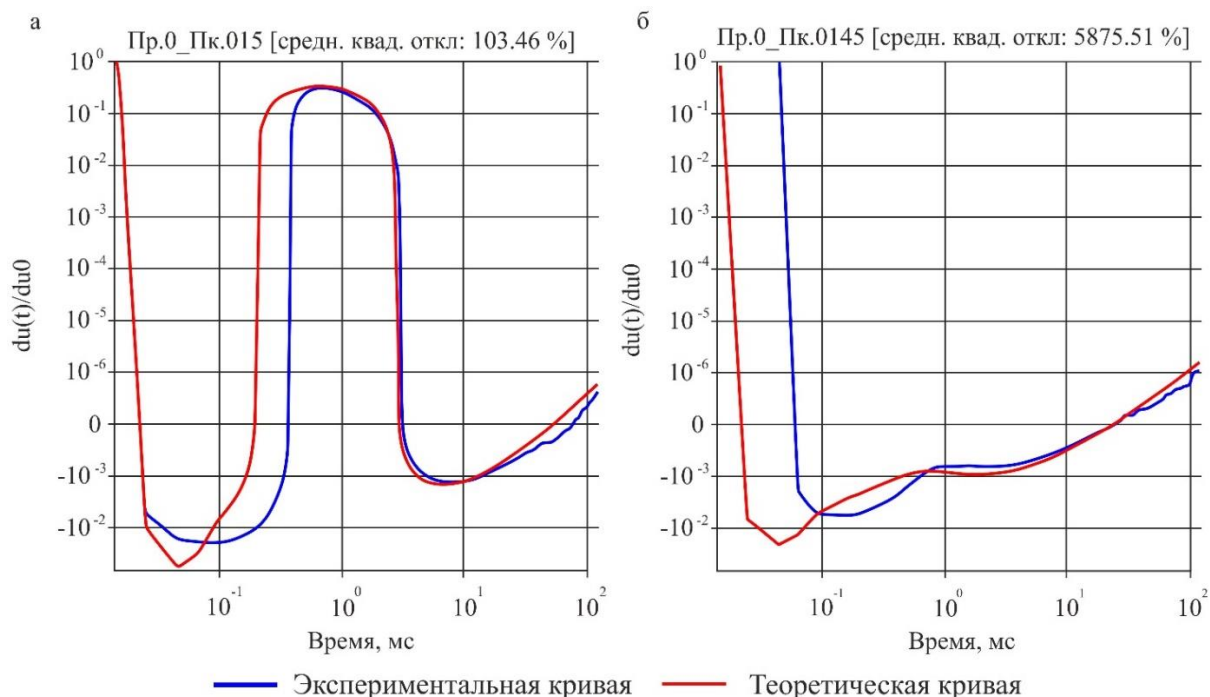


Рисунок 3. Сравнение формы спада фронта импульса в среде для соосной установки. Невязка рассчитана для интервала времен 0.015-0.065 мсек. (а) – наилучшее значение невязки на площади, (б) – наихудшее значение невязки на площади

Трехмерная инверсия осуществлялась в тех слоях, где согласно одномерному подбору локализован объект, характеризующийся пониженным сопротивлением. Слои разбивались на блоки размерами 250x250 м. Толщины блоков соответствовали мощностям слоев. Ряд блоков снаружи измерительной установки служит для компенсации влияния окружающей среды. В программе ИТЕМ-IP осуществлялась совместная инверсия для соосной и ортогональной установок с учетом подобранного спада импульса тока в генераторной линии. В качестве стартового приближения, всем блокам были присвоены значения сопротивления слоев.

Ниже на рисунке 4 представлен результат трехмерной инверсии с итоговым распределением удельного электрического сопротивления в блоках среды, полученного в результате совместной инверсии соосной и ортогональной установок. Благодаря трехмерной инверсии удалось выделить высокоомный слой, связанный с ПКС, и локализовать низкоомную полость, заполненную соляным раствором, по глубине.

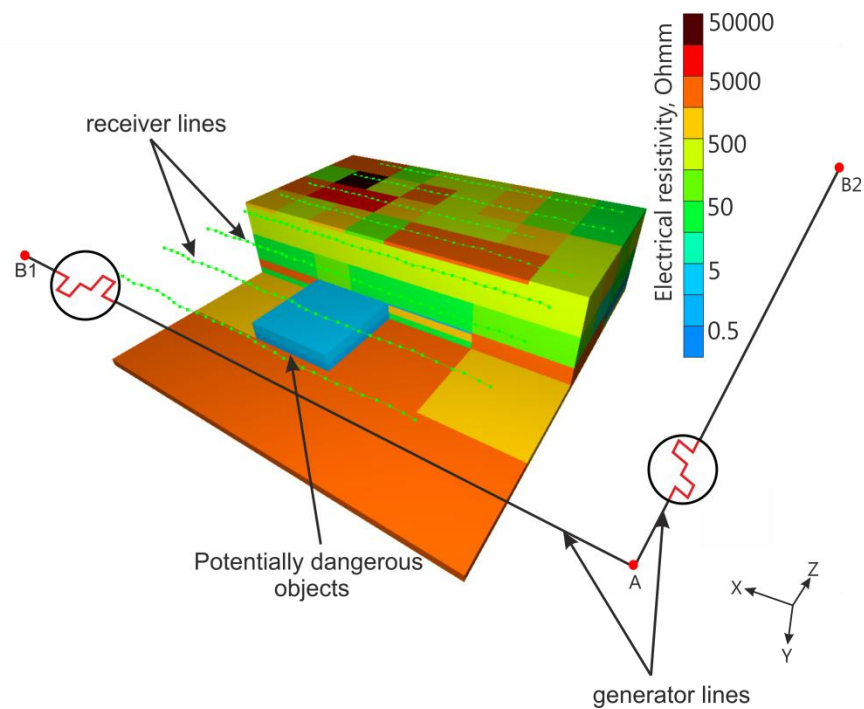


Рисунок 4. Пример трехмерной инверсии данных ЭМЗ-ВП

На полученных картах по одномерной и трехмерной инверсии оцифрована аномальная низкоомная зона, в солях, связанная с водонасыщением пород (Рис. 5).

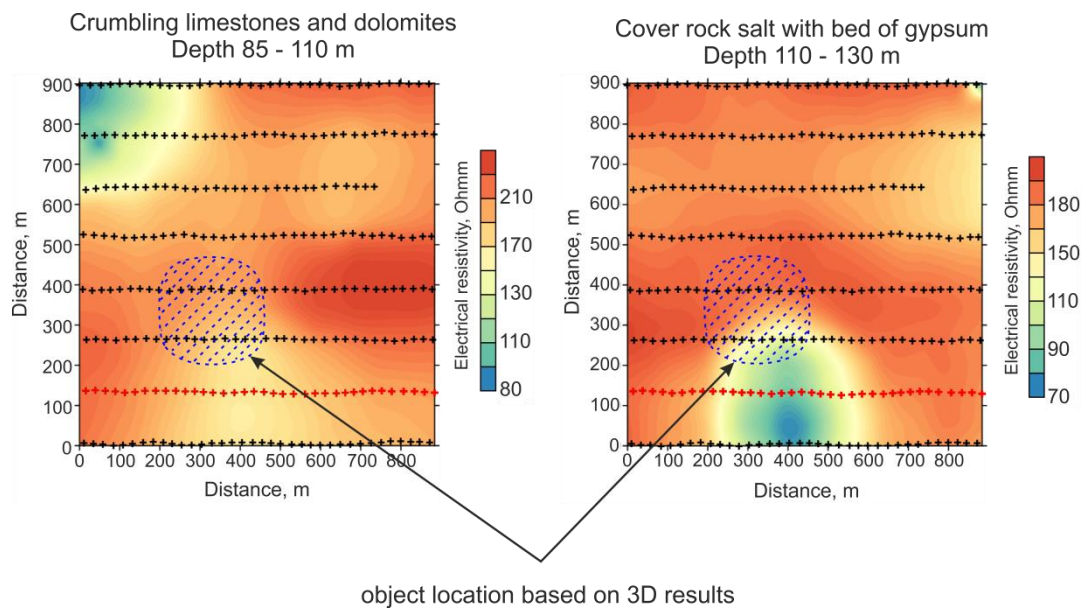


Рисунок 5. Сопоставление результатов одномерной и трехмерной инверсии

Выводы

По результатам опытно-методических работ технологией ЭМЗ-ВП на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей сделаны следующие выводы:

1. Учет формы импульса тока при решении обратной трехмерной задачи повысил сходимость наблюдаемых и модельных данных.
2. В результате трехмерной инверсии данных площадной съемки для соосной и ортогональной установки были получены устойчивые решения прямых и обратных задач.
3. Удалось уточнить геологическое строение разреза до глубины 250 м. По результатам одномерной инверсии данных ЭМЗ-ВП в высокоомном слое была выявлена аномальная зона. По результатам трехмерной инверсии данная низкоомная зона была локализована как в плане, так и по глубине.

Библиография

1. Давыденко Ю.А., Попков П.А., Новопашина А.В. Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 4. С. 73–84.
2. Пестерев И.Ю. А.с. № 2012660743 «Программа одномерной инверсии «Mars1D». Заявка № 2012618705 от 16.10.2012. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28 ноября 2012 г. Правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Гелиос».
3. Persova, M.G., Soloveichik, Y.G., Trigubovich, G.M. and Tokareva, M.G. [2013] Methods and algorithms for reconstructing three-dimensional distributions of electric conductivity and polarization in the medium by finite-element 3D modeling using the data of electromagnetic sounding. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, **49**(3), 329-343