

Электротомография рудного штабеля при кучном выщелачивании золота

В.В. Оленченко* (ИНГГ СО РАН), П.С. Осипова (ИНГГ СО РАН) А.С. Калганов (ИНГГ СО РАН), А.В. Чекрыжов (ИНГГ СО РАН)

Введение

Кучное выщелачивание – это эффективный способ добычи урана, меди, золота из бедных и забалансовых руд. Основными проблемами при кучном выщелачивании (КВ) являются образование канальной фильтрации, кольматация порового пространства и нарушение гидроизоляции в основании рудного штабеля (Воробьев, 2000). Образование сквозных каналов фильтрации выщелачивающих растворов в штабеле приводит к недоизвлечению металла, так как при этом возникают обширные участки непроработанной руды. Вследствие физико-химического выветривания рудной массы происходит образование мелких частиц породы (кольматанта), которые закупоривают поры, что препятствует проникновению раствора в массив и также приводит к недоизвлечению полезного компонента. Нарушение гидроизоляции при монтаже штабеля также является причиной неконтролируемой утечки растворов металлов, приводящей к потере продукции и осложнению экологической обстановки.

Одним из эффективных способов контроля процесса КВ и выявления мест нарушения гидроизоляции являются геофизические методы. Основным методом при изучении штабелей КВ является электротомография с различными типами установок и схем наблюдения (Rucker, 2010; Rucker et al. 2012; Rucker et al. 2012; Rucker et al. 2009). Судя по отсутствию соответствующих публикаций, в России технологии контроля процесса КВ с помощью геофизических методов не развиты. Нет сведений о внедрении подобных технологий на крупных горно-металлургических комбинатах и предприятиях, занимающихся кучным выщелачиванием руд. Кучное выщелачивание проводится «вслепую», без использования методов неразрушающего контроля.

Мы провели площадные исследования методом электротомографии (ЭТ) на рудном штабеле одного из золотодобывающих предприятий в Забайкалье. Главной целью исследований являлась оценка качества орошения рудного штабеля на завершающей стадии выщелачивания. Основными задачами были: построение трёхмерной геоэлектрической модели штабеля, выделение участков канальной фильтрации в теле штабеля, выделение блоков непроработанной руды и выявление возможных мест утечек через слой гидроизоляции основании штабеля.

Характеристика объекта

Штабель кучного выщелачивания имеет поперечные размеры в основании 320×220 м и переменную высоту от 5 до 20 м. Рудный штабель работал два сезона 2018-2019 гг. и 2019-2020 гг., при этом во втором сезоне проводилось наращивание штабеля рудной массой. Дополнительные секции укладывались на отработанную поверхность. Размер фракции рудной массы в среднем составляет 10 мм. Укладывание руды в штабель проводилось самосвалами. В период 2018-2019 гг. руда орошалась растворами с повышенным содержанием ионов кальция, что приводило к кальцитизации рудной массы и ухудшению проницаемости штабеля. В сезон 2019-2020 гг. состав растворов был изменён на рН-нейтральный. Однако в результате окисления сульфидов повышается кислотность растворов и ухудшаются их свойства. Для снижения кислотности поровых растворов в руду добавляют известь, которая после растворения приводит к росту рН растворов до 10-12. Орошение штабеля проводится дождеванием через систему пластиковых труб. На момент проведения геофизических исследований система орошения отключалась.

Методика исследований

Зондирования проведены по сети из 13 профилей длиной по 315 м. Расстояние между профилями составляло 15 м, шаг измерения по профилю – 5 м.

В качестве аппаратуры использовалась многоэлектродная многоканальная электроразведочная станция «Скала-64к15». Последовательность подключения электродов соответствовала трехэлектродным прямой AMN и встречной MNB установкам. Максимальный разнос AM составлял 210 м при MN равном 105 м. Глубинность исследований составила не менее 60 м.

Трёхмерная инверсия электроразведочных данных проводилась с помощью программы Res3Dinv. Применялся робастный способ инверсии. В процессе решения обратной задачи в стартовой модели задавалась резкая граница, имитирующая плёнку гидроизоляции. Сведения о глубине залегания пленки были из характеристики рудного штабеля. После 5 итераций подбора среднеквадратичное отклонение составило 10,8 %, что говорит о хорошем качестве инверсии.

Результаты

Интерпретационным критерием для выделения в объеме штабеля участков непроработанной руды или канальной фильтрации является известная связь удельного электрического сопротивления пород (УЭС) с насыщенностью пор влагой и её электропроводностью, следующей из закона Арчи – чем выше насыщенность и электропроводность влаги, тем ниже УЭС (Archie, 1942). Электропроводность поровой влаги в свою очередь зависит от минерализации, кислотности или щёлочности. При возрастании минерализации УЭС породы существенно снижается.

Интерпретация данных ЭТ, полученных на рудном штабеле, осложняется тем, что руда закладывается с известью для увеличения рН системы. В процессе растворения извести увеличивается водородный показатель, что приводит к росту электропроводности порового раствора. Таким образом, аномалии низкого УЭС в рудном штабеле будут связаны как с участками повышенной влажности, так и с повышенной щелочностью растворов. Причём при возрастании рН УЭС породы будет ниже, чем при увеличении влажности. Как правило, участки влажной и сухой руды хорошо дифференцируются по УЭС и однозначно интерпретируются на геоэлектрических разрезах.

Для оценки качества гидроизоляции в основании штабеля используются следующие интерпретационные критерии. Если плёнка не имеет повреждений, через которые возможны утечки растворов, то она препятствует прохождению электрического тока. Если в пленке есть повреждения и утечка растворов, то и электрический ток будет проходить через плёнку, так как ток в горных породах имеет ионную природу (за исключением рудных минералов). На двумерных геоэлектрических разрезах при качественной гидроизоляции в основании штабеля как правило выделяется область высокого УЭС. Если пленка нарушена, то на разрезе УЭС в основании штабеля проявляется аномалия пониженного УЭС. Аномалия низкого УЭС в основании штабеля на разрезах, построенных по 2-D инверсии, говорит только о наличии утечки, однако локализация места нарушения возможна только после трёхмерной инверсии и построения объемной модели или её срезов по глубине заложения плёнки.

На рисунке 1 показана объёмная геоэлектрическая модель рудного штабеля. УЭС модели изменяется от первых десятков (влажная руда с высоким рН) до первых сотен Ом·м (маловлажная или сухая руда). На поверхности штабеля проявляется закономерное изменение УЭС, проявляющееся в виде прямоугольных областей пониженного электросопротивления, разделённых участками повышенного УЭС. Аномалии высокого УЭС отмечаются в месте заезда самосвалов на штабель. Это дает основание интерпретировать области повышенного УЭС как участки маловлажной руды, уплотнённые под технологическими проездами на рудном штабеле. Другими словами, в результате уплотнения рудной массы под технологическими дорогам

внутри штабеля сформировались слабопроницаемые барьеры, имеющие в плане структуру «кварталов».

Значения УЭС руды внутри «кварталов» составляют 20-30 Ом·м. Такие низкие значения связаны с повышенной щелочностью поровых вод. В пересчете на минерализацию поровых растворов содержание солей составляет примерно 2-3 г/л.

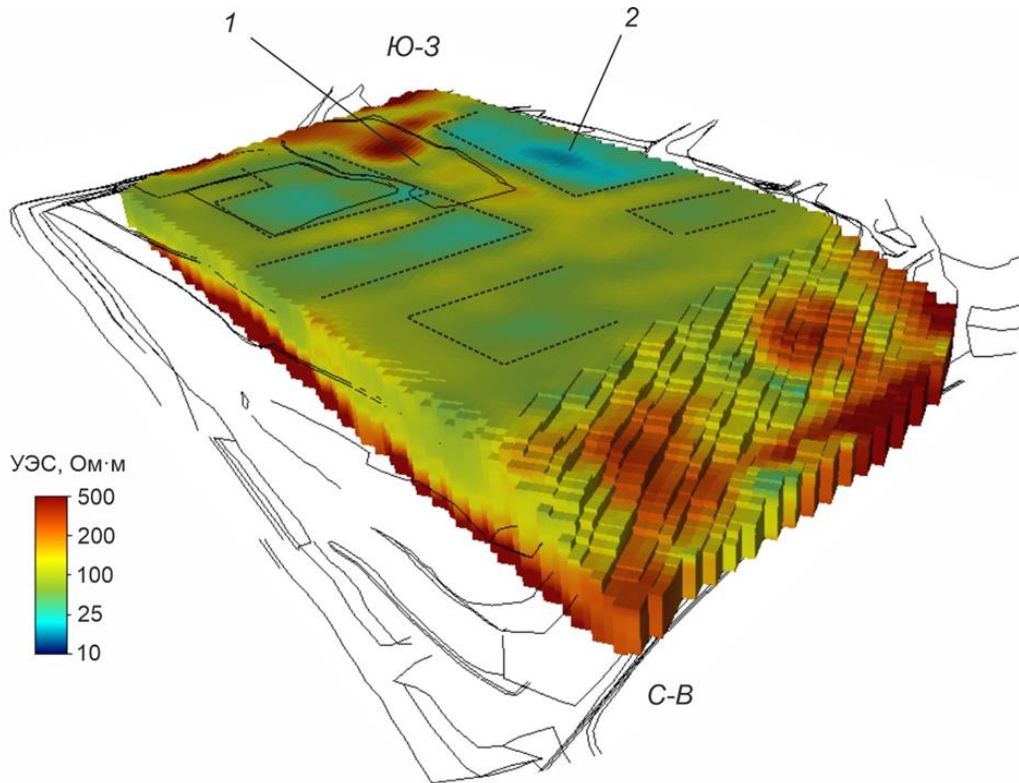


Рисунок 1. Объемная геоэлектрическая модель рудного штабеля: 1 – область повышенного УЭС вдоль технологической дороги; 2 – аномалия низкого УЭС.

На вертикальных разрезах УЭС проявляются особенности распределения растворов внутри штабеля. На рисунке 2 показаны разрезы УЭС по результатам 3-D инверсии.

На разрезе по линии А-Б (рис. 2б) выделяются две низкоомные зоны (3), представляющие собой каналы фильтрации выщелачивающих растворов в разрезе. При этом в одном канале УЭС составляет 9-11 Ом·м, а во втором 27-30 Ом·м, что говорит о разной щелочности поровых растворов. Хорошо заметна разница в УЭС руды старого (2018 г.) и нового (2019 г.) штабелей. Высокое УЭС руды старого штабеля означает, что растворы не проникают в него.

На разрезе по линии В-Г (рис. 2в) в интервале профиля 170-290 м область низкого УЭС (15-20 Ом·м), связанная со щелочными поровыми растворами, распространяется до глубины 10 м (1). Ниже УЭС руды резко возрастает до 150 и более Ом·м. Согласно априорной информации, эта геоэлектрическая граница отражает положение границы старого (2018 г.) и нового (2019 г.) штабелей. В разрезе выделяется высокоомная перемычка (2), уплотнённая слабопроницаемая область под технологической дорогой, которая препятствует равномерному распределению растворов в плане. Узкой аномалией низкого УЭС (3) выделяется канал фильтрации в разрезе, по которому растворы стекают в коллектор.

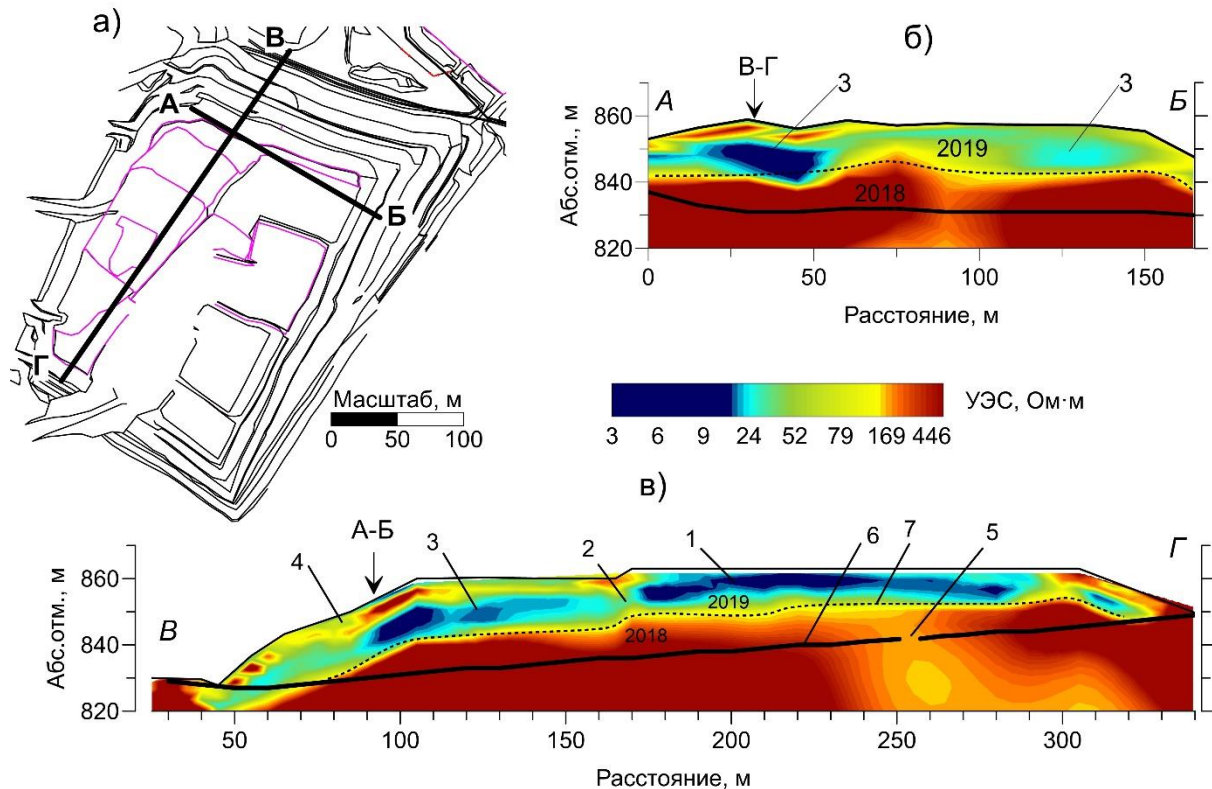


Рисунок 2. Схема рудного штабеля (а) и геоэлектрические разрезы по результатам 3-D инверсии по линиям А-Б (б) и В-Г (в): 1 – область растворов с высоким рН; 2 – слабопроницаемая перегородка; 3 – каналы фильтрации; 4 – повышенное УЭС на откосах штабеля; 5 – предполагаемое место нарушения гидроизоляции; 6 – уровень плёнки; 7 – граница старого (2018 г.) и нового (2019 г.) штабеля.

Хорошо заметно, что откосы штабеля имеют высокое УЭС, а значит низкую влажность. Следовательно объем рудной массы, расположенный на откосах, нуждается во вторичной переработке.

В интервале 250-270 м разреза В-Г в высокоомном основании выделяется аномалия пониженного УЭС, вероятно связанная с местом нарушения гидроизоляции (5) и утечкой растворов под пленку. Анализ карты распределения УЭС на глубине заложения плёнки показал наличие нескольких локальных аномалий низкого электросопротивления, которые предположительно связаны с местами нарушения гидроизоляции.

Выводы

В результате электротомографии штабеля кучного выщелачивания установлено, что под технологическими дорогами сформировались слабопроницаемые зоны, которые препятствуют равномерному распределению растворов в штабеле, что приводит к застою растворов.

Внутри рудного штабеля выделено два канала фильтрации, по которым происходит сток растворов в коллектор. Это снижает эффективность работы кучи, так как большой объем рудной массы не смачивается растворами.

Показано, что растворы не проникают в старый штабель, и это, вероятно, связано с кальцитизацией рудной массы. Высокое УЭС откосов также говорит о том, что рудная масса не вовлекается в процесс обогащения.

В основании штабеля выявлено несколько аномалий пониженного УЭС, природа которых объясняется нарушением в слое гидроизоляции. При этом по результатам 2-D инверсии аномалия низкого УЭС в основании штабеля говорит только о наличии утечки, однако локализация места нарушения возможна только после трёхмерной инверсии и построения объемной модели или её срезов по глубине заложения плёнки.

Благодарности (на ваше усмотрение)

Работа выполнена при поддержке ООО «Геоэлектрика» и проекта ФНИ № 0331-2019-0007 «Геоэлектрика в исследованиях геологической среды: технологии, полевой эксперимент и численные модели».

Библиография

1. Воробьев, А. Е. [2000] Основные проблемы кучного выщелачивания золота из техногенного минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, **9**, 34-46.
2. Archie, G. [1942]. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Transactions of AIME*, **146**, 54–62.
3. Rucker, D. [2010]. Moisture estimation within a mine heap: An application of cokriging with assay data and electrical resistivity, *Geophysics*, **75(1)**, B11-B23.
4. Rucker, D., Crook, N., Glaser, D., and Loke, M. [2012]. Pilot-scale field validation of the long electrode electrical resistivity tomography method, *Geophysical Prospecting*, **60(6)**, 1150-1166.
5. Rucker, D., Fink, J., and Loke, M. [2011]. Environmental monitoring of leaks using time-lapsed long electrode electrical resistivity, *Journal of Applied Geophysics*, **74(4)**, 242-254.
6. Rucker, D., McNeill, M., Schindler, A., and Noonan, G. [2009] Monitoring of a secondary recovery application of leachate injection into a heap. *Hydrometallurgy*, **99**, 238–248.

References

1. Archie, G. [1942]. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Transactions of AIME*, **146**, 54–62.
2. Rucker, D. [2010]. Moisture estimation within a mine heap: An application of cokriging with assay data and electrical resistivity, *Geophysics*, **75(1)**, B11-B23.
3. Rucker, D., Crook, N., Glaser, D., and Loke, M. [2012]. Pilot-scale field validation of the long electrode electrical resistivity tomography method, *Geophysical Prospecting*, **60(6)**, 1150-1166.
4. Rucker, D., Fink, J., and Loke, M. [2011]. Environmental monitoring of leaks using time-lapsed long electrode electrical resistivity, *Journal of Applied Geophysics*, **74(4)**, 242-254.
5. Rucker, D., McNeill, M., Schindler, A., and Noonan, G. [2009] Monitoring of a secondary recovery application of leachate injection into a heap. *Hydrometallurgy*, **99**, 238–248.
6. Vorobiev, A.E. [2000] The main problems of heap leaching of gold from technogenic mineral raw materials. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, **9**, 34-46.