

## 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.

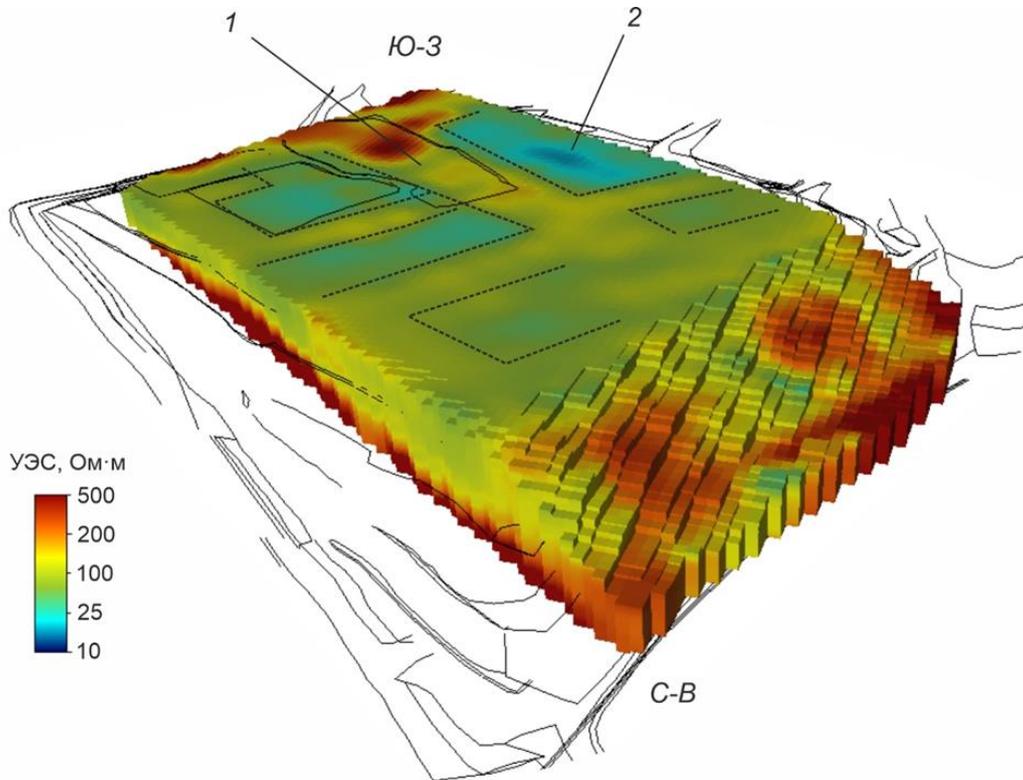
Интерпретация данных ЭТ, полученных на рудном штабеле, осложняется тем, что руда закладывается с известью для увеличения рН системы. В процессе растворения извести увеличивается водородный показатель, что приводит к росту электропроводности порового раствора. Таким образом, аномалии низкого УЭС в рудном 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.

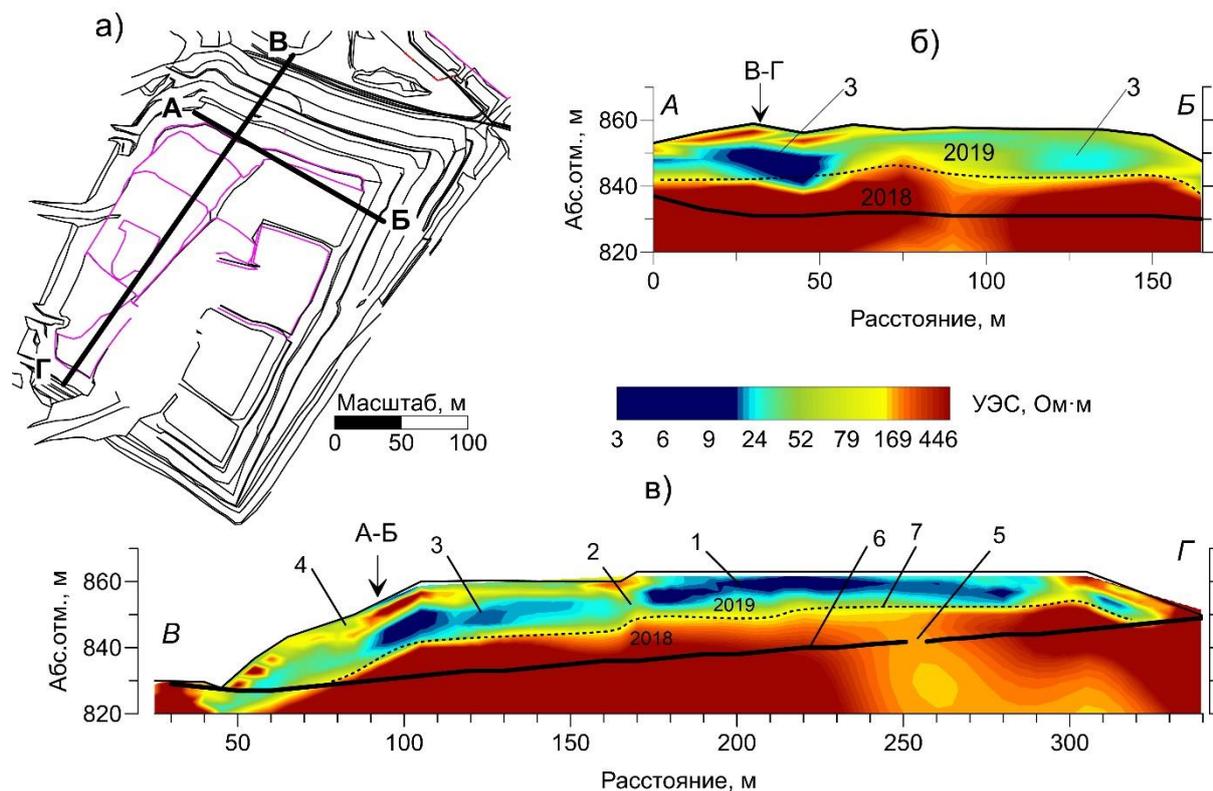


**Рисунок 1.** Объемная геоэлектрическая модель рудного штабеля: 1 – область повышенного УЭС вдоль технологической дороги; 2 – аномалия низкого УЭС.

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 перемычка; 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.

