

УДК 622.272:621.37

О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, А.В. Кононов

**3-D МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИНДУКЦИОННОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ И СИСТЕМА
ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ
КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК**

Приведены результаты исследования по применению просвечивания для изучения состояния предохранительного целика.

Ключевые слова: рудник, пластическая деформация рудных тел, безопасная отработка месторождений, электромагнитная индукционная активная система.

Семинар № 2

**O.A. Nachay, O.Y. Nachay,
A.V. Kononov**

**3-D METHOD OF ELECTROMAGNETIC
INDUCTIVE RAY EXAMINATION AND SYSTEM FOR
PROCESSING AND INTERPRETATION USED FOR
STUDY KIMBERLITE PIPES**

The study results on ray examination of protective pillar are given.

Key words: ore mine, ore body plastic deformation, safe mining, electromagnetic inductive system.

Для конкретных рудников ОАО АПРОСА большое значение имеет мониторинг состояния предохранительного рудного целика для контроля и оценки его состояния. Причины изменения состояния массива, являющегося открытой динамической системой, могут быть связаны с техногенными факторами, влияющими на его динамику.

Традиционное описание пластической деформации твердых тел проводится в рамках механики сплошной среды и теории дислокаций [1-3]. В рамках этой теории не удастся проанализировать процесс зарождения и

распространения трещины, аномальное поведение породного массива в полях сильных внешних воздействий.

Из накопленного экспериментального материала Томской школой под руководством академика В.Е. Панина, сформулированы новые подходы к проблемам пластичности и прочности [4]. Среди них особого внимания заслуживает синергетический подход, рассматривающий деформируемое твердое тело как открытую, сильнонеравновесную систему, а пластическое течение как диссипативный процесс, снижающий уровень упругих напряжений. При этом пластическая деформация твердых тел может протекать только в условиях неоднородного напряженного состояния. Пластический сдвиг зарождается в зонах концентраторов напряжений как локальное структурное превращение и распространяется только в поле концентратора напряжений сугубо как релаксационный процесс. Основные концентраторы напряжений связаны с границами раздела и различного рода зонами стесненной

деформации. Важный вывод, сделанный В.Е.Паниным и его соавторами, заключается в том, что пластическое течение твердого тела имеет волновой характер.

В связи с этим большое значение имеет найти взаимосвязь измеряемых макроскопических характеристик геофизических и геомеханических полей с так называемыми параметрами среды на мезоуровнях [6-11].

Применяемая электромагнитная индукционная активная система 3-D картирования и мониторинга позволяет разработать критерии оптимальной безопасной отработки месторождений на глубоких горизонтах [12].

Методики, используемые в наших исследованиях, носят экспрессный характер и доведены до стадии внедрения как сопровождающие технологический процесс отработки массива. Они включают в себя аппаратуру МЧЗ-12 (разработчик д.т.н. Человечков А.И.), комплекс обработочных и интерпретационных программ (разработчики Хачай О.Ю., к.ф.-м.н. Хачай А.Ю., Новгородова Е.Н.). Преимуществом этого геофизического комплекса является его помехоустойчивость и отсутствие требования дополнительного бурения для проведения работ. Он является комплексом неразрушающего контроля за поведением массива горных пород. Эти методики были опробованы на шахтах "Магнезитовая", "Магнетитовая", Естюнинская, на Узельгинском, Таштагольском, Дальнегорском рудниках, на соляной шахте БКРУ-4, шахтах СУБРа и ЮУБРа [5, 10].

При отработке месторождения с закладкой попасть внутрь выработок, проходящих через рудное тело, и произвести детальные поуровневые электромагнитные индукционные исследования не представляется воз-

можным [5]. Однако задача об изучении особенностей строения и динамики состояния предохранительного целика, расположенного в кровле отработанного уровня, сформулирована. В этом случае имеется только один способ – электромагнитное индукционное просвечивание на ряде частот. В условиях шахты этот способ более трудозатратный и менее технологичный по сравнению с попланшетной электромагнитной съемкой, поэтому в качестве эксперимента мы осуществили его только на одной частоте $.635\text{кГц}$, используя ту же аппаратуру, что и для попланшетных наблюдений, МЧЗ-12 (разработчик д.т.н. А.И.Человечков ИГФ УрО РАН). Измеряемый сигнал для модулей всех трех компонент магнитного поля был устойчив, и значения превышали фоновые на 2 порядка. Исследования велись следующим образом (рис.1,2): сначала измеритель располагался на профиле 1 с 4-го по 15 пикет (точки наблюдения расположены через 5м), а генератор на 2-ом профиле (точки стояния генератора 7, 9, 11, 13, 15, 17). Измерения проводились по профилю 1 для каждого положения генератора, при этом измерения модулей горизонтальных компонент магнитного поля проводились в направлении на источник возбуждения, через массив (эту компоненту обозначим H_ρ) и в соответствующем перпендикулярном направлении (эту компоненту обозначим H_ϕ). Это обеспечивает большую точность выявления зон локальной неоднородности вдоль отрезка прямой от источника до приемника. Как и в попланшетной методике в каждой точке наблюдения определялся параметр геоэлектрической неоднородности для заданной частоты наблюдения в виде отношения модулей двух горизонтальных компонент маг-

нитного поля: $\delta = \frac{|H_\varphi|}{|H_\rho|} 100\%$. Пере-

мещая генератор согласно указанным точкам стояния, мы определяем по профилю 1 набор данных в виде

$$|H_{zi}|, |H_{ri}|, |H_{\varphi i}|, \delta_i, \rho_{effi} = 2fr^2 \frac{|H_{zi}|}{|H_{ri}|},$$

где ρ_{effi} – кажущееся сопротивление, f – частота, i – номер точки стояния генератора. Затем генератор и приемник менялись местами: генератор располагался на профиле 1 (точки стояния – пикеты 4, 7, 10, 15), а приемник перемещался по профилю 2 с 7 по 18 пикеты с шагом 5 м при каждом положении генератора. Таким образом, мы получаем новый набор данных

$$|H_{zj}|, |H_{rj}|, |H_{\varphi j}|, \delta_j, \rho_{effj} = 2fr^2 \frac{|H_{zj}|}{|H_{rj}|}.$$

Вместе эти два набора данных характеризуют область массива в кровле и в почве, охватывающегося двумя профилями (1 и 2). Для того чтобы оценить степень неоднородности массива по полученным данным электромагнитного индукционного просвечивания О.Ю. Хацаев был разработан следующий алгоритм. Целью данного алгоритма обработки, включающего в себя линейную интерполяцию, было задать значения нового параметра, базирующегося на значениях параметров $\delta_i, \delta_j, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$, m – количество точек стояния генератора на профиле 2, n – количество точек стояния генератора на профиле 1, на некоторой прямоугольной сетке, покрывающей область исследования, с равномерно расположенными узлами. Данная процедура довольно специфична и потому не является стандарти-

зованной, и для ее выполнения нельзя было непосредственно воспользоваться средствами пакета Surfer. Используя план данного участка шахты, всем точкам измерения были сопоставлены относительные координаты в горизонтальной плоскости (в метрах). Весь рассматриваемый участок плана был заключен в ограничивающий его прямоугольник, на котором была произведена расстановка узлов сетки. Теперь нужно было каждому такому узлу сетки с целочисленными индексами (k, l) сопоставить значение нового параметра $\overline{\delta_{k,l}}$. Это значение принималось равным среднему арифметическому следующих чисел $\delta_{k,l}^{mm}$. Для того, чтобы понять, как вычислялись значения $\delta_{k,l}^{mm}$, представляется удобным произвести мысленно следующие геометрические построения. Сначала рассмотрим ситуацию, когда текущим профилем в обработке является 1-й профиль (на нем пикеты с 4 по 15). Соединим отрезками пикет 4 профиля 1 с пикетом 5 того же профиля и с пикетом 7 профиля 2 (на этой точке стоял генератор). В этом треугольнике была произведена линейная интерполяция значений исходного параметра δ_i . Для этого, конечно, нужно было задать значение δ в третьей вершине треугольника – на пикете 7 профиля 2. Это значение выбиралось с помощью линейной интерполяции между значениями δ_j , определенными на этой точке, но когда здесь стоял приемник, а генератор перемещался по 1-му профилю, итак, с помощью линейной интерполяции между значением δ_j в этой точке при генераторе, стоящем на 4-м пикете 1-го профиля и значением δ_i в этой точке при генераторе, стоящем на 7-м пике-

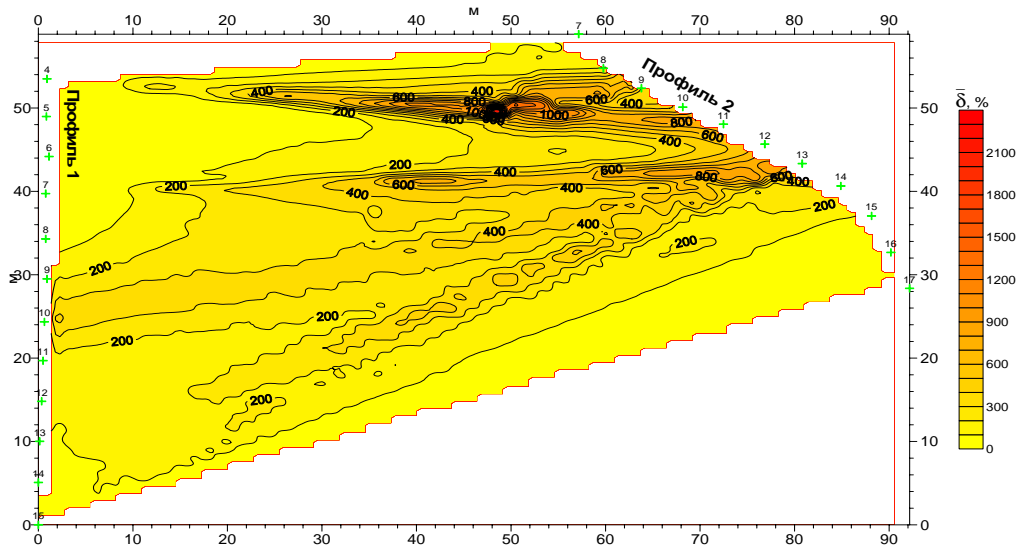


Рис. 1. Распределение среднего параметра геоэлектрической неоднородности $\overline{\delta_{k,l}}$ по данным электромагнитного индукционного просвечивания. Частота 0.635 кГц

те 1-го профиля. Аналогично, линейной интерполяцией вычислялись значения δ внутри треугольников (пикет | профиль): $\{(5|1), (6|1), (7|2)\}$, $\{(6|1), (7|1), (7|2)\}$. При переходе к следующему треугольнику изменялась его третья вершина: $\{(7|1), (8|1), (9|2)\}$, а вся процедура оставалась прежней. И так далее – до конца профиля. Затем начиналась обработка 2-го профиля, тогда третьи вершины треугольников располагались на 1-м профиле, например, $\{(7|2), (8|2), (4|1)\}$. После того, как линейная интерполяция внутри таких треугольников была закончена для обоих профилей, можно было вычислить значения $\delta_{k,l}^{mn}$. Индексам (k,l) соответствует номер узла сетки, имеющий координаты на плане (x,y) . Если данная точка попала в какой-то из указанных выше треугольников интерполяции, то номер mn увеличивался на единицу, а $\delta_{k,l}^{mn}$ присваивалось значение, полученное в результате линейной интерполяции по треугольнику в точке с

координатами (x, y) . Такая процедура была произведена для всех треугольников и узлов сетки. Затем путем арифметического усреднения на множестве $\delta_{k,l}^{mn}$ при фиксированных индексах (k,l) было получено значение $\overline{\delta_{k,l}}$.

На рис. 1 приведен пространственный план распределения среднего параметра геоэлектрической неоднородности $\overline{\delta_{k,l}}$ второго цикла мониторинга.

По сравнению с данными первого цикла мониторинга образовалась зона повышенной неоднородности протяжением через кровлю массива с 4 пикета профиля 2 до 10-11 пикетов профиля 1 и зона неоднородности менее интенсивная, простирающаяся от профиля 1, пикеты 11-13 вглубь массива, не доходя до профиля 2. Вдоль этих зон могут происходить пластические деформации, которые следует контролировать с помощью геомеханических и повторных электромагнитных исследований. Распре-

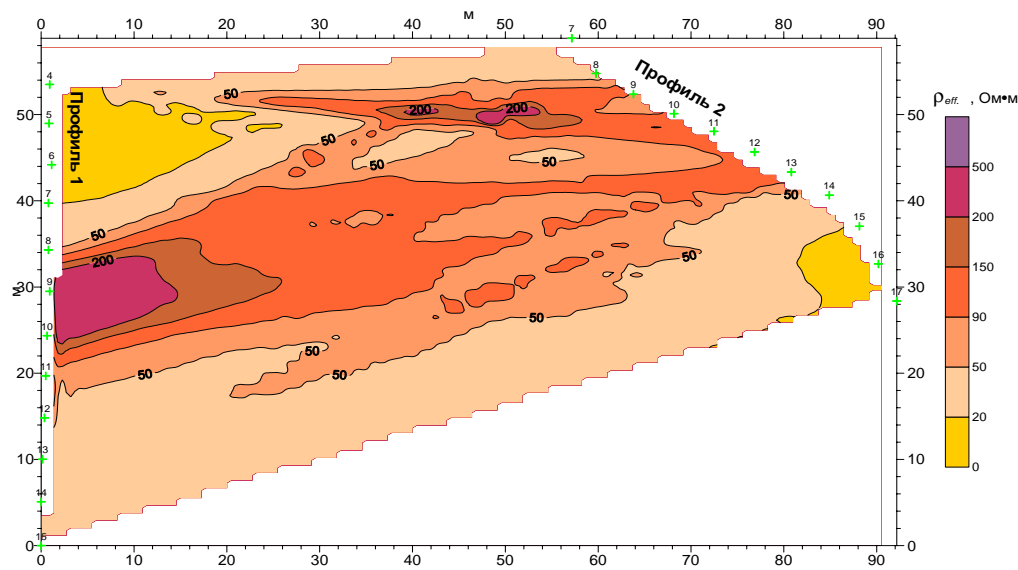


Рис. 2. Распределение эффективного электрического сопротивления $\rho_{eff, k,l}$ по данным электромагнитного индукционного просвечивания. Частота 0.635 кГц

деление параметра $\overline{\rho_{eff, k,l}}$ строилось по алгоритму, аналогичному описанному выше для $\overline{\delta_{k,l}}$. На рис. 3 представлен план распределения среднего параметра $\overline{\rho_{eff, k,l}}$ на частоте 0.635 кГц. В результате совместной интерпретации пространственных распределений $\overline{\delta_{k,l}}$ и $\overline{\rho_{eff, k,l}}$ были получены поуровневые распределения удельных сопротивлений для всего участка в кровле массива и представлены в виде таблицы.

Следуя результатам, изложенным в таблице можно выделить второй и третий слой в кровле массива по значению значительного изменения удельного сопротивления внутри слоя. Наиболее проводящим интервал, а следовательно, возможно более обводненным является 2-й слой от -591.5 м до -589.5 м. Для оконтуривания в слоях расположения зон с пониженным сопротивлением, необходимо в рамках методики просвечивания иметь замкнутую систему наблюдения в виде про-

филей, расположенных по периметру участка. Тем не менее, полученная информация свидетельствует о наличии резкой неоднородности в кровле массива. Для оценки устойчивости состояния массива необходимы повторные и даже лучше мониторинговые исследования в рамках описанной методики просвечивания.

Заключение

Результат исследований по применению просвечивания показал возможность его использования в тех случаях, когда затруднено проникно-

№ слоя	Отметки слоя (м) в кровле от контура выработки	Изменение удельного сопротивления в слое (Ом·м) по всему участку наблюдения	Мощность слоя (м)
1	-596.5(-591.5)	25.7-178.4	5
2	-591.5(-589.5)	0.9-147	2
3	-589.5(-570.5)	4.1-130.8	19
4	-570.5(-559.5)	40.8-235	11.5
5	-559.5(-549)	90.8-494	10.5

вление внутрь изучаемого объекта. Эти исследования имеют смысл проводить не только для изучения состояния предохранительного целика, но и для изучения состояния залочного массива на более глубоких горизонтах. Применяемая система обработки и интерпретации информации позволяет разделить отклик массива в кровле и в почве.

Для более достоверной и детальной интерпретации необходимо дополнить систему наблюдений таким образом, чтобы изучаемый недоступный участок массива был окружен выработками, по которым можно было бы провести индукционные электромагнитные исследования с активным источником возбуждения, описанным выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1. М.: Наука, 1983. С.528.
2. Христианович С.А. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981. С.483.
3. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. С.599.
4. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск. СО АН СССР Наука. 1985. С.226.
5. Хачай О.А., Хинкина Т.А., Хачай О.Ю. Отражение динамики фазового состояния массива горных пород по результатам многоуровневых электромагнитных мониторинговых исследований в удароопасной шахте (Таштагол) // Горный Информационно-аналитический бюллетень Москва, МГГУ, 2002, №11, с.109-114
6. Хачай О.А., Новгородова Е.Н.. Опыт построения объемных геоэлектрических моделей по многоуровневым электромагнитным исследованиям на шахтах различного вещественного состава.// Горный Информационно-аналитический бюллетень Москва, МГГУ, 2002, №10, с.57-59.
7. Хачай О.А. К вопросу об изучении строения и состояния геологической гетерогенной нестационарной среды в рамках дискретной и иерархической модели.//Российский геофизический журнал 2004, №33-34, с. 32-37.
8. Хачай О.А. Явления самоорганизации в массиве горных пород при техногенном воздействии. // Физическая мезомеханика, 7, спец. выпуск, ч.2, 2004, с.292-295.
9. Хачай О.А. Теория и практические результаты мониторинга гетерогенных нестационарных сред в рамках иерархических дискретных моделей. // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды Международной конференции 6-9 октября 2003г. ИГД СО РАН Новосибирск. 2004, с.401-408.
10. Хачай О.А., Шагабудинов В.Х. Оценка состояния ударо-опасного массива с использованием системы электромагнитного индукционного мониторинга (на примере Николаевского подземного рудника, г.Дальнегорск) // Горный информационно-аналитический бюллетень. Изд-во МГГУ, Москва, 2006, №6, 109-120.
11. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Изучение, оценка и классификация устойчивости геологической среды с использованием данных активного геофизического мониторинга на основе парадигмы физической мезомеханики. // Физическая мезомеханика, 2007, Т.10, №2, С.87-92..
12. Хачай О.А. Исследование развития неустойчивости в массиве горных пород с использованием метода активного электромагнитного мониторинга.// Физика Земли, 2007, №4, с.65-70.
13. Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Хачай А.Ю. Исследование разрешающей способности попланшетной электромагнитной методики для активного картирования и мониторинга неоднородных геоэлектрических сред. // Физика Земли, 2003, №1, с.30-41. **ПЛАБ**

Коротко об авторах

Хачай О.А. – доктор физико-математических наук, Институт геофизики УрО РАН,
Хачай А.Ю. – аспирант математико-механического факультета УрГУ, office@ursmu.ru
Кононов А.В. – инженер, Институт геофизики УрО РАН, gorm@mail.ru