

*С. И. Евдокимов, И. М. Евдокимов*

### **МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ИНДУКТИВНОСТИ ПЕТЛИ (МИВП) ДЛЯ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

За время более чем полувекового существования индуктивной петлевой электроразведки, позволяющей проводить глубинное зондирование переменными электромагнитными полями, накопилось много данных о возможностях петлевых методов получать данные об электромагнитных свойствах геологических разрезов. Но до настоящего времени нет четкого представления о возможностях петлевых методов. Исследования, проводившиеся по совершенствованию метода индуктивности петли привели к созданию полевой аппаратуры и модельной установки, измеряющей начальные значения индуктивности петель и модельных рамок с погрешностью 0,001%. Модельная установка создавалась с такими параметрами, чтобы результаты измерения были адекватны аналогичным измерениям реальных петель в полевых условиях. Это позволило создать палетки для расшифровки магнитных аномалий с возможностью определения основных параметров геологического объекта, создающего магнитную аномалию, а именно: объема магнитной массы, глубины до верхней и нижней кромки, площади горизонтального сечения и его магнитной восприимчивости. Полученные данные геометрического зондирования дополняются результатами частотного зондирования и измерений по определению индуктивно вызванной поляризации и частотной дисперсии. Измерение со столь малой погрешностью позволило провести моделирование для оценки возможностей индуктивных петлевых методов при измерении отклика (чистого аномального эффекта — только от тела без влияния вмещающих пород) от тел разного размера в зависимости от глубины залегания. Модели тел были выбраны с такими параметрами, чтобы их магнитные и электрические свойства создавали приблизительно одинаковые аномальные эффекты. Это было сделано для того, чтобы можно было с одинаковой степенью достоверности прогнозировать ожидаемый аномальный эффект от тела определенного

размера на определенной глубине. Следует иметь в виду, что речь идет о сплошных сливных рудных телах. Если рудная залежь представлена несколькими сравнительно мелкими проводящими телами по отношению к размеру петли, то аномальный эффект от них будет незначительным. Если тела обладают значительной магнитной восприимчивостью, то аномальный эффект от группы мелких тел будет равен сумме аномальных эффектов от каждого тела и может быть сопоставим со сливным рудным телом. В случае измерения взаимной индуктивности большой и малой петли или рамки в центре большой петли аномальный эффект взаимной индуктивности в несколько раз выше, чем аномальный эффект одиночной петли. Это дает возможность решать задачи геометрического зондирования с меньшим числом петель и более точно определять магнитную восприимчивость и объем магнитной массы и оценивать размеры сплошного проводящего объекта.

Из приведенной таблицы 1 следует, что малые тела площадью менее 1/16 площади петли, даже расположенные близко к поверхности, создают величину относительного аномального эффекта менее 1%, при мощности тела превышающей глубину скин-слоя, а на глубине равной стороне петли величина относительного аномального эффекта составляет тысячные доли процента. Данные моделирования хорошо согласуются с результатами полевых измерений на глубокозалегающих объектах, см. таблицу 2. Данное исследование показало, что для получения достоверно интерпретируемых результатов от глубоко залегающих тел промышленного размера или близко расположенных тел малого размера необходима высокая точность измерения, см. таблицу 1.

Данные, приведенные в таблице 1, применимы к оценке аномальных эффектов, получаемых во всех петлевых индуктивных методах электроразведки — Методе Переходных Процессов, Незаземленной

Таблица 1

Величины относительных аномальных эффектов от локальных тел разного размера в зависимости от глубины залегания на примере петли размером 400×400 м

$S_{\text{тела}}/S_{\text{петли}}$	$h = 1/100$ 4 метра		$h = 1/4$ 100 метров		$h = 1/2$ 200 метров		$h = 1$ 400 метров	
	$\Delta L/L_0, \%$	$\Delta M/M_0, \%$	$\Delta L/L_0, \%$	$\Delta M/M_0, \%$	$\Delta L/L_0, \%$	$\Delta M/M_0, \%$	$\Delta L/L_0, \%$	$\Delta M/M_0, \%$
1 400×400	36	94	4,5	23,3	1,1	4,9	0,18	0,66
1/2 200×400	8,4	65	1,7	11,1	0,44	2,1	0,07	0,28
1/4 200×200	1,9	35	0,74	6,4	0,21	1,0	0,03	0,13
1/8 100×200	0,42	12	0,24	2,23	0,07	0,35	0,014	0,07
1/16 100×100	0,12	4,6	0,07	0,78	0,022	0,14	0,005	0,04
1/32 50×100	0,03	1,3	0,02	0,25	0,014	0,03	0,002	0,02

**Примечания:**  $S_{\text{тела}}$  — площадь тела;  $h$  — глубина до тела;  $\Delta L = L - L_0$ , где  $L$  — индуктивность одиночной петли на частоте  $F$ , на которой вторичное поле вызвано только рудным телом, т.е. без влияния вмещающей среды;  $L_0$  — начальное значение индуктивности петли;  $\Delta M = M - M_0$ ;  $M$  — взаимная индуктивность большой петли и малой петли или рамки в центре на частоте  $F$ , на которой вторичное поле вызвано только рудным телом, т.е. без влияния вмещающей среды.

Петли, Совмещенной Петли, Методе Искусственного Подмагничивания, МИВП и др.

В геофизике принято правило, по которому для получения интерпретируемых данных аппаратурно-методическая погрешность метода измерения должна быть в три раза меньше величины чистого аномального эффекта [Электроразведка, 1989].

Примером применения методики работ на хорошо изученном месторождении, но неизвестном для исполнителей, являются работы, проведенные на Изыгском месторождении в Красноярском крае (рис. 1). Месторождение расположено на юго-западных отрогах Восточного Саяна. Рудные тела представлены пластообразными линзами. Глубина

Таблица 2

Величины чистых аномальных эффектов относительно начального значения индуктивности одиночных петель в %, измеренные на реальных месторождениях

Месторождения	Сторона петли, м	Глубина до тела, м	Величина чистого аномального эффекта $\Delta L/L_0, \%$	Величина чистого аномального эффекта $\Delta M/M_0, \%$	Допустимая максимальная погрешность, %	Измерено с погреш- ностью, %
Октябрьское	400	300	0,12		0,04	0,03
Чебачье	400	350	0,19		0,06	0,01
Юбилейное	600	400	0,12		0,04	0,01
Круглогорское	600	300	0,16		0,05	0,02
Краснокаменское	1000	950	0,12		0,04	0,008
Изыгское	100	150	0,09		0,03	0,01
	200	150	0,10		0,033	0,01
	400	150	0,29	3,0	0,1	0,01
Березовское	400	450	0,05		0,017	0,01
	800	450	0,055	1,14	0,018	0,005
Гора Сосновая	100	80	0,076		0,025	0,01
	200	80	0,10	2,2	0,033	0,01
	400	350	0,11	1,8	0,037	0,01
	800	350	0,104	1,9	0,035	0,005

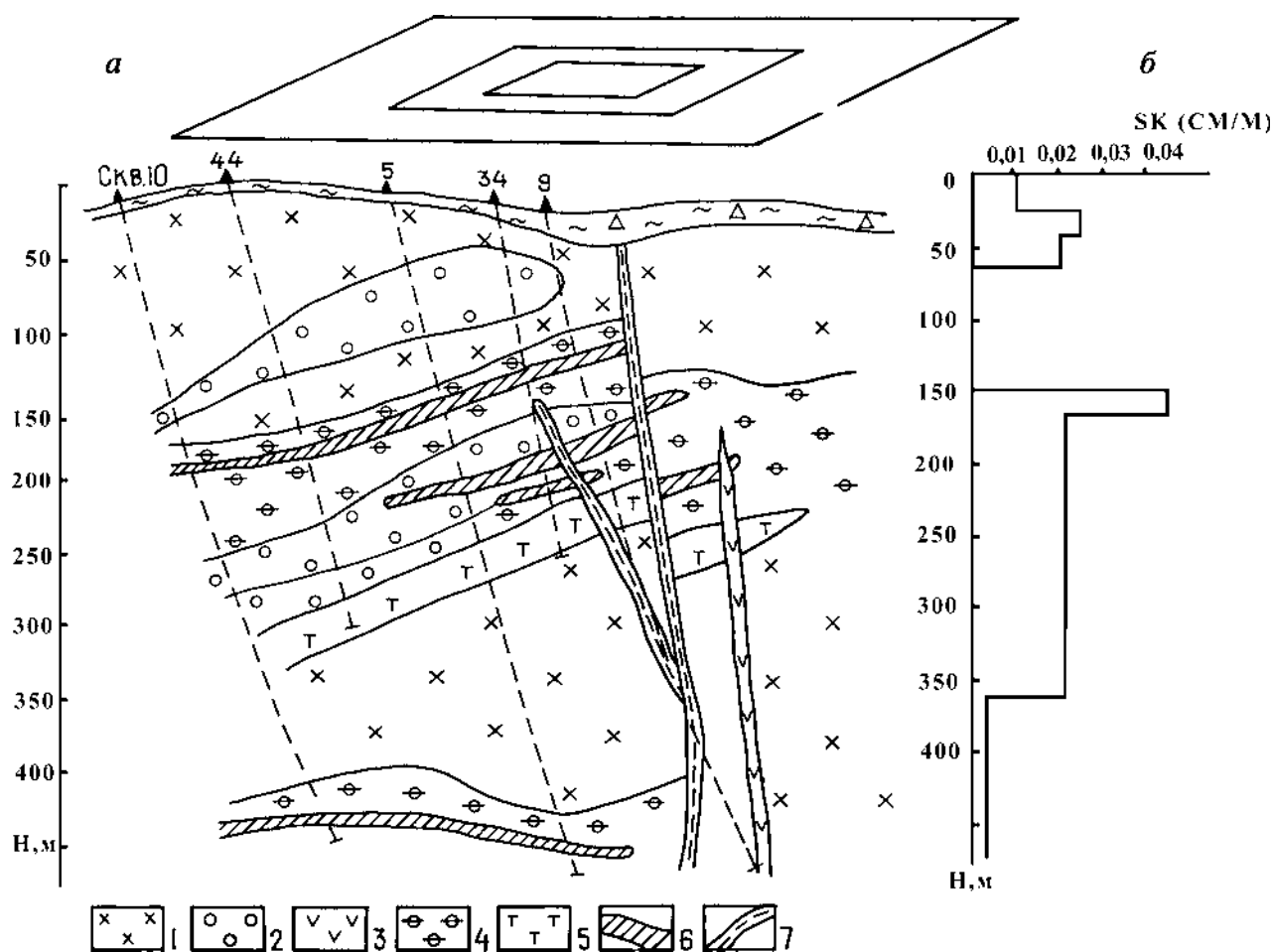


Рис. 1. Геоэлектрический разрез Изыгского месторождения: а — геологический разрез с петлями МИВП, б — график послойной проводимости  $S(H)$

Условные обозначения: 1 — диориты, 2 — скарны, 3 — порфириты, 4 — альбитовые породы, 5 — туфы, 6 — магнетитовая руда, 7 — зоны дробления

залегания верхней линзы составляет 100–180 м, ее средняя мощность 10 м. Нижняя залегает на глубине 150–210 м. Вмещающие породы — диориты, скарны магнитные —  $\dot{\alpha} = 100\text{--}1000$  ед. СГС. На участке месторождения и в нормальном поле были разложены соосные петли с размерами сторон 100, 200, 400 м. Проведено нивелирование по периметрам петель. Индуктивность и взаимная индуктивность измерены на частотах 31–2000 Гц. Аномальные эффекты  $\Delta L$  и  $\Delta M$ , рассчитанные по принятой методике, составили:  $\Delta L$  — 100 м — 0,4%, 200 м — 0,56%, 400 м — 0,79%;  $\Delta M$  — 200 + 400 м — 5%. Необычно высокий аномальный эффект на петле 100×100 м показывает, что породы аномального участка обладают несравненно большей магнитной восприимчивостью, чем породы в нормальном поле. Рассчитана величина магнитной восприимчивости вмещающих пород и на основании этого получена поправка в измеряемую величину, затем рассчита-

ны чистые аномальные эффекты от магнитных объектов, которые составили:  $\Delta L$  — 100 м — 0,09%, 200 м — 0,1%, 400 м — 0,29%;  $\Delta M$  — 200 + 400 м — 3%. По палеткам магнитного зондирования получены размер магнетитового пласта, его площадь, мощность и глубина залегания. Площадь приблизительно 400×400 м, мощность 35 м, глубина до верхней кромки 120–140 м. Магнитная восприимчивость 1,1–1,4 ед. СИ. На диаграмме послойной проводимости четко выделяются в верхней части разреза рыхлые отложения и кора выветривания, слой высокоомных пород — диоритов, ниже которых основной пласт магнетитов выделяется тонким слоем, под которым рудовмещающая толща представленная сильномагнитными скарнами, альбитами и отдельными линзами магнетитов. Магнетитовый пласт, лежащий на глубине 450 м, не выделился, так как сигнал с этой глубины для петли 400×400 м измеряется на пределе чувствительности. Данный

пример показывает, что объект, состоящий из пакета субгоризонтальных пластов, интерпретируется по магнитным свойствам как единый пласт суммарной мощности. По электрическим же свойствам происходит разделение на отдельный пласт и блок высокой проводимости, что, несомненно, дополняет представление о геологическом строении магнитной аномалии.

Магнитная аномалия неизвестной природы на горе Сосновой (Красноярский край) была оценена с помощью метода индуктивности петли. В результате интерпретации была выявлена структура, состоящая из двух предположительно магнетитовых тел, расположенных горизонтально одно над другим. Верхнее тело размером  $200 \times 100 \times 25$  м на глубине 80 м. Нижнее тело размером  $800 \times 400 \times 200$  м на глубине 350 м. Качественный анализ кривых кажущейся проводимости показывает на значительное увеличение проводимости с уменьшением размеров петлей (рис. 2). Характерные формы кривых дают дополнительные основания для предположения наличия хорошо проводящих тел на двух уровнях. Обращает на себя внимание резкое прекращение роста проводимости при снижении частоты, что может быть вызвано только высокими значениями магнитной восприимчивости верхнего тела, характерными только для сливных магнетитов. Нами было рекомендовано бурение вертикальной скважины глубиной не менее 600 м в центре сис-

темы петель. Наклонная скважина, устье которой находилось на расстоянии более 200 м от эпицентра аномалии, вскрыла на глубине 350 м нижнее тело, представляющее собой бедные магнетитовые руды. Скважина прошла далеко в стороне от верхнего тела.

Краснокаменная рудная аномалия (Челябинская обл.) вызвана залегающим на глубине 950 м пластообразным почти горизонтальным рудным телом, перекрытым слабомагнитными породами (рис. 3).

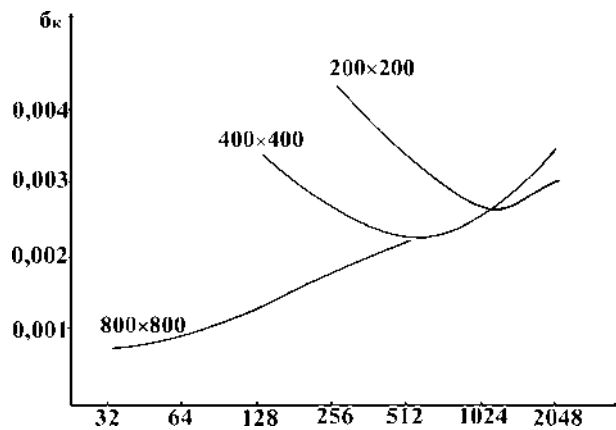


Рис. 2. Кривые частотного зондирования для петлей на аномалии горы Сосновой

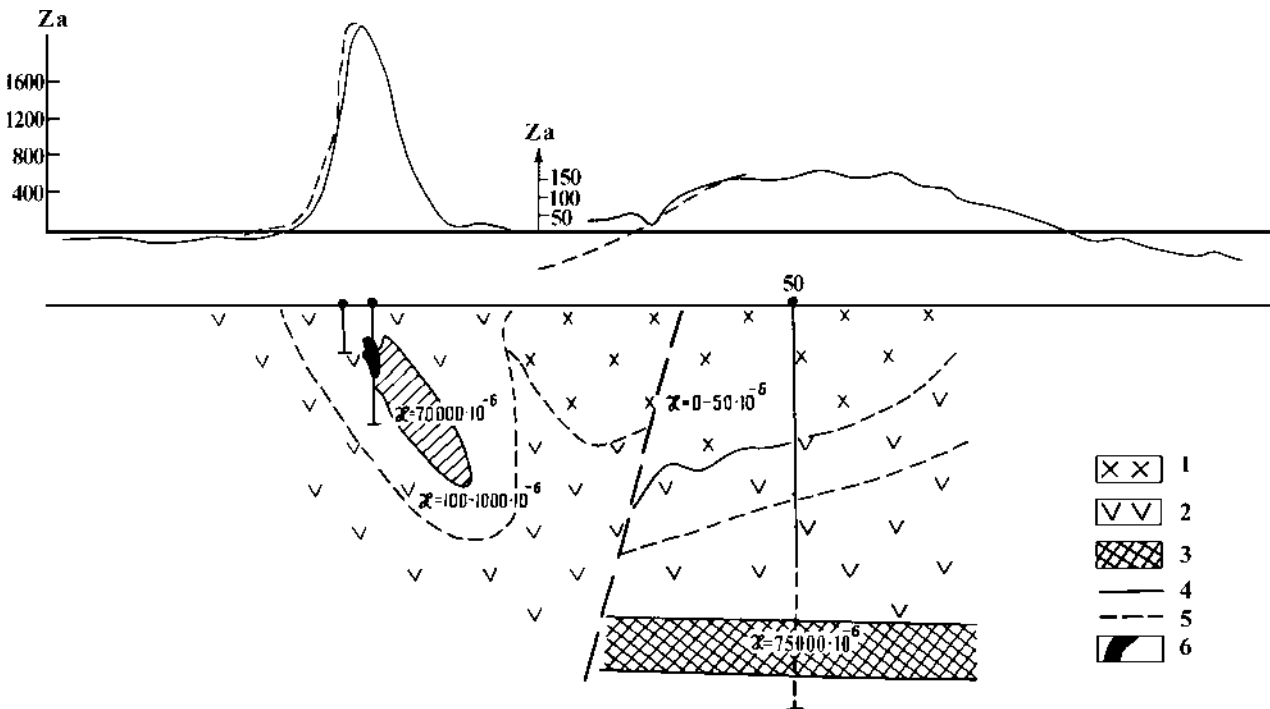


Рис. 3. Схематический геологический разрез Краснокаменной рудной аномалии

Условные обозначения: 1 — диориты, сиениты, граносиениты; 2 — порфириды плагиоклазовые андезито-дацитового и андезитового состава; 3 — рудные тела предполагаемые; 4 — кривая  $Z_a$  измеренная; 5 —  $Z_d$  расчетная; 6 — установленное рудное тело

В целом работы, проведенные на Краснокаменской аномалии, показали принципиальную возможность регистрировать аномальные эффекты индуктивности от рудной залежи, расположенной на глубине 1 км. Для количественной интерпретации аномалии необходимо проводить измерения с петлями большого размера, применяя методику измерения взаимной индуктивности на частотах 1–2 Гц. Минимальный размер петель должен быть 1000×1000 м, максимальный 2400×2400 м. При таких условиях могут быть определены глубина залегания тела, его объем и магнитная восприимчивость. При этом должна быть обеспечена аппаратно-методическая погрешность измерения не более 0,005%.

Поисковые работы на графиты. В порядке опытной проверки МИВП на поиски графитовых месторождений были проведены поисковые работы в районе графитовой залежи у г. Миасс. На участке работ была проведена съемка петлями размером 100×100 м. Измерения проводились двухвитковой петлей двумя способами: измерялась индуктивность двухвитковой петли с пятикратным умножением и взаимная индуктивность между витками петель. Это позволило увеличить разрешающую способность метода по сравнению с одновитковой петлей в 20 раз. Всего на участке было разложено 25 петель. В результате съемки была выявлена и околонтурена аномалия проводимости. График частотной зависимости (рис. 4) для петли с наибольшим аномальным эффектом имеет вид резко аномальный — сильный подъем проводимости с уменьшением частоты. По результатам работ построен схематический план

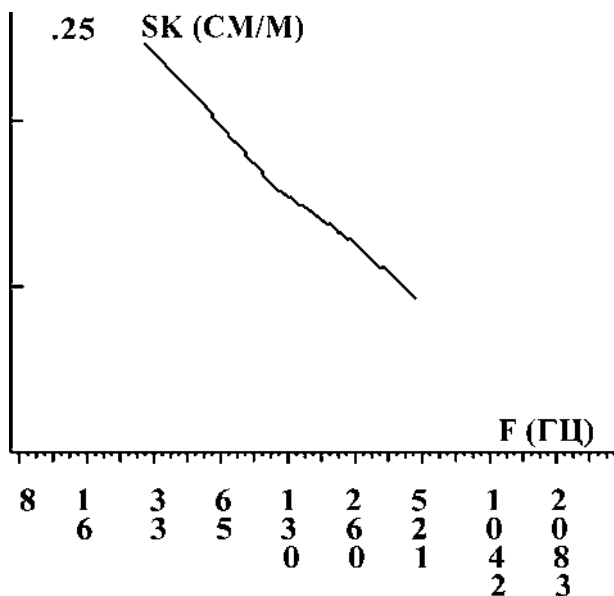


Рис. 4. График частотной зависимости проводимости для петли N 20 около г. Миасс

участка работ с изолиниями кажущейся проводимости, на котором отчетливо прослеживается форма аномалии, указывающая на расположение проводящей зоны. Наибольшая интенсивность аномалии, свидетельствующая о наиболее близком к поверхности расположении проводящего объекта, позволила сделать вывод о том, что объект погружается в направлении на юго-восток. Нами было рекомендовано бурение одной скважины с точным указанием координат. На данном участке проводились также детальные поисковые работы методом МПП (Челябинская экспедиция). По результатам работ было пробурено 20 скважин, и только та скважина, которая была рекомендована нами, вскрыла на глубине 59 м чистые графиты. Остальные скважины не подсклели графиты. Причина неудачи, по нашему мнению, кроется в неспособности аппаратуры МПП измерять полезные сигналы от среды в условиях высокого уровня помех. Участок окаймляет высоковольтная линия с двух сторон под углом 90°. Обращаем внимание на график послышной проводимости (рис. 5), который показывает на значительное увеличение проводимости на глубине 62 м и глубже. При этом проводимость достигает очень больших значений — 3,2 См/м. Полученные значения проводимости графитов близки к истинным и свидетельствуют о том, что данная методика расчетов послышной проводимости содержит возможность определения проводимости локальных объектов, погруженных на значительную глубину.

На рис. 6 представлены схематический геологический разрез и график послышной проводимости по результатам работ на Октябрьском меднокол-

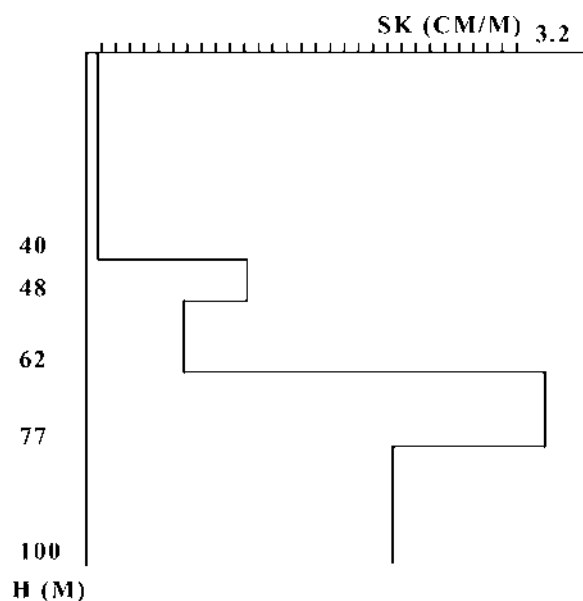


Рис. 5. График послышной проводимости для петли N 20 около г. Миасс

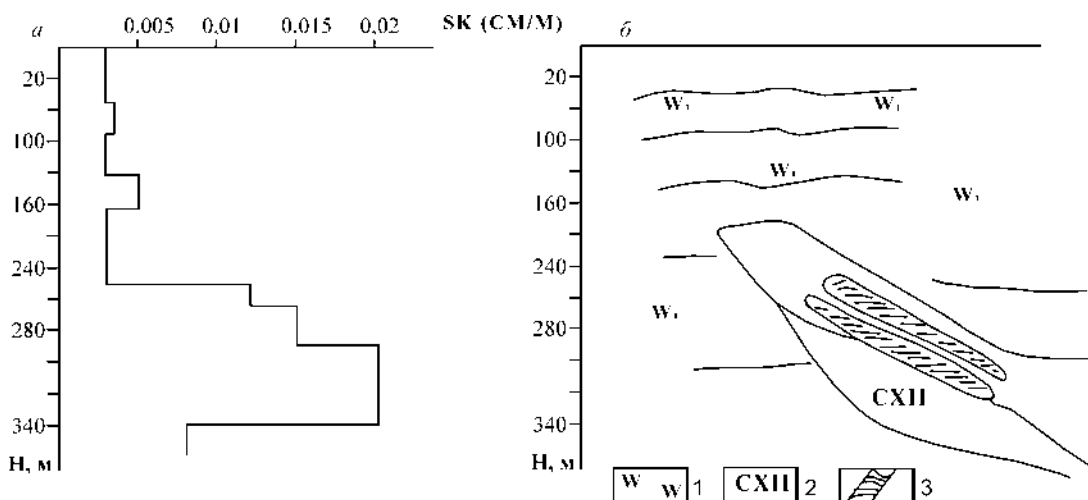


Рис. 6. Геологический разрез (б) и график послойной проводимости (а) на Октябрьском месторождении медных колчеданов  
 Условные обозначения: 1 — эффузивно-осадочные породы, 2 — серицит-хлоритовые метасоматиты, 3 — рудные тела

чеданном месторождении. Полевые работы были проведены над 5-й и 6-й залежами месторождения, которые представляют собой линзы медноколчеданных руд, кулисообразно расположенные на глубинах 250–300 м. Вмещающие породы представлены высокоомными дацитами баймак-бурибайской свиты. Мощность ореола изменения (метасоматитов) достигает 100–150 м. Мощность рыхлых отложений не превышает 5–10 м. На графике послойной проводимости (см. рис. 6) верхняя часть разреза слабопроводящая, но с глубины 270 м выделяется слой повышенной проводимости ( $SK = 0,012$  См/м), а на глубине 285 м проводимость достигает значений 0,02 См/м, что указывает на хорошо проводящее рудное тело. Возможность разделения на такие малые интервалы по глубине обеспечивается высокой точностью измерения индуктивности петли.

На рис. 7 изображена палетка для интерпретации результатов измерений, полученных на магнитных аномалиях с целью определения перспективности данной аномалии на слепое магнетитовое оруденение. Следует обратить внимание на то, что для интерпретации могут быть использованы величины аномальных эффектов от 0,01% до 20%.

Приведенные результаты измерений на модельной установке и в поле наглядно свидетельствуют о том, что применение мостового способа измерения позволяет оценить возможности индуктивных петлевых методов. Практика лабораторных измерений индуктивности рамки доказала возможность получения воспроизводимых результатов с относительной погрешностью до 0,0001%. В полевых условиях индуктивность петли неоднократно измерялась с относительной погрешностью до 0,001%, что подтверждалось повторными измерениями с не-

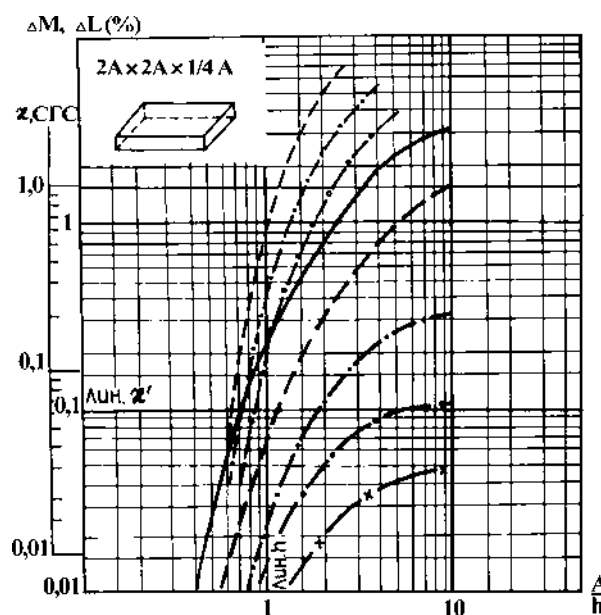


Рис. 7. Палетка магнитного зондирования

$A$  — половина стороны петли,  $h$  — глубина до верхней кромки тела обладающего повышенной магнитной восприимчивостью

зависимой раскладкой петли. Высокая точность измерений параметров петли позволяет вычислять и оценивать кроме проводимости и магнитной восприимчивости еще и поляризуемость, и частотную дисперсию среды и погруженных на глубину локальных объектов.

**Литература:**

Электроразведка: Справочник геофизика: В 2 кн. / Под ред. В.К. Хмелевского, В.М. Бондаренко. — 2-е изд. — М.: Недра, 1989. — Кн. 1. — 438 с.