УДК 550.838

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА ГРАНИЦЫ ДВУХ СРЕД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СКВАЖИНАХ

Глухих И.И., Белоглазова Н.А. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург
Корнилков В.С – Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург
Лузянин П.В. – ООО «Ванадий» Качканарский ГОК, Качканар

Аннотация. Предложена методика определения угла наклона границы двух сред по данным трехкомпонентного скважинного магнитометра типа МИ-3803М без построения аномальных векторов геомагнитного поля. Приведены результаты опробования предложенной методики при проведении измерений в разведочных и буровзрывных скважинах.

Определение элементов залегания пластов, аномальные вектора геомагнитного поля, скважинный магнитометр.

ON DETERMINATION ANGLE BOUNDARY BETWEEN TWO MEDIA RESULTS FOR TERNARY MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS IN BOREHOLES

Gluchich I.I., Beloglazova N.A. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg
Kornilkov V.S. – Institute of Mining UB of RAS, Yekaterinburg
Lousianin P.V. – LLC «Vanadium» KGOK, Kachkanar

Abstract. The method for determining the angle of the boundary between two media according to the three-component borehole magnetometer type MI-3803M without constructing the anomalous geomagnetic field vectors was proposed. The results of testing the proposed technique for measurements in a exploratory and shot holes is presented.

Identify elements of occurrence of layers, anomalous geomagnetic field vector, downhole magnetometer.

Введение

Определение элементов залегания границы двух сред имеет принципиальное значение при проведении магнитометрических исследований в одиночных скважинах таких, как сверхглубокие, опорные, параметрические, морского бурения, когда основой для построения геологического разреза являются результаты изучения кернового материала и общие региональные геологические представления.

В настоящее время определение элементов залегания пластообразных тел по измерениям внутреннего и внешнего магнитных полей проводится по методикам, предложенным В.Н. Пономаревым и А.Н. Бахваловым (Пономарев, Бахвалов, 1964; 1969; Магниторазведка, 1990). Методики основаны на известном положении о непрерывности магнитной индукции (**B**) при переходе из среды с одной магнитной проницаемостью в среду с другой магнитной проницаемостью (Говорков, 1968; Смайт, 1954) и вычислении аномальных значений векторов напряженности магнитного поля во взаимно ортогональных плоскостях. На практике достаточно нередки ситуации, когда результаты расчетов по скважинным магнитометрическим измерениям не совпадают с геологическими данными. Эти расхождения могут быть связаны с погрешностями измерений, построения векторов аномального магнитного поля и погрешностью выбора точек расчета при больших градиентах измеряемого магнитного поля, но могут иметь и объективное обоснование.

Методика расчета

Вследствие непрерывности линий магнитной индукции нормальные к граничной поверхности составляющие вектора **B** в соседних точках, лежащих соответственно по одну и другую сторону границы, должны быть равны ($B_{n1} = B_{n2}$). А касательная составляющая вектора **H** на границе двух сред должна быть непрерывна в случае от-

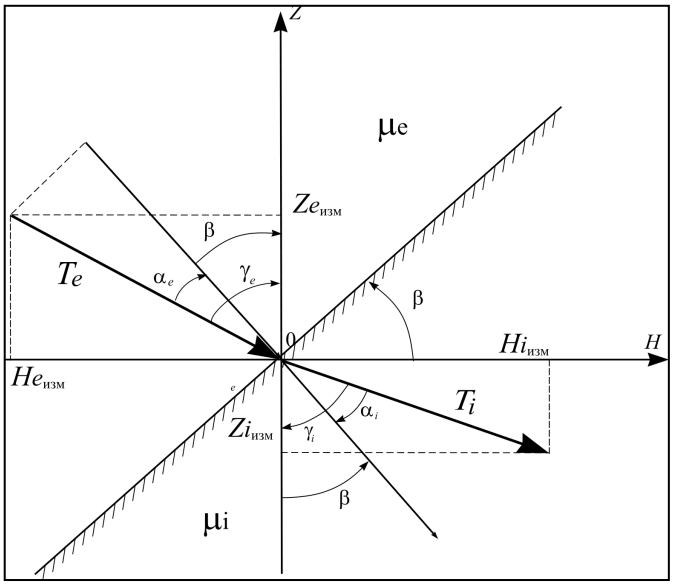

Рис. 1. Магнитное поле на границе двух сред: β – угол наклона границы, отсчитывается от горизонтали против часовой стрелки; γ – угол между вертикальной осью системы координат и вектором магнитного поля $T_{изм}$ (отсчитывается от вертикали против часовой стрелки); α – угол между перпендикуляром к поверхности границы и вектором магнитного поля $T_{изм}$ (отсчитывается по часовой стрелке)

сутствия тока ($H_{t1} = H_{t2}$) (Говорков, 1968).

Основываясь на этих положениях, можно по результатам измерений в скважине трех компонент магнитного поля определить угол наклона границы двух сред без построения аномальных векторов напряженности магнитного поля.

Рассмотрим ситуацию, соответствующую контакту вмещающей среды с магнитной проницаемостью μ_e и рудного тела с магнитной проницаемостью $\mu_i > \mu_e$ (рис. 1).

Исходя из условия о непрерывности линий магнитной индукции ($B_{ne} = B_{ni}$) и учитывая, что $\alpha_e = \beta - \gamma_e$, а $\alpha_i = \beta - \gamma_i$, имеем

$$\mu_e \cdot T_e \cdot \cos(\beta - \gamma_e) = \mu_i \cdot T_i \cos(\beta - \gamma_i).$$

После небольших преобразований угол наклона границы двух сред определяется:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\mu_i Z_{i\text{изм}} - \mu_e Z_{e\text{изм}}}{\mu_e H_{e\text{изм}} - \mu_i H_{i\text{изм}}}. \quad (1)$$

При выходе силовых линий из рудного тела (μ_i) во вмещающую среду ($\mu_e < \mu_i$), угол наклона границы определяется по формуле:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\mu_e Z_{e\text{изм}} - \mu_i Z_{i\text{изм}}}{\mu_i H_{i\text{изм}} - \mu_e H_{e\text{изм}}}. \quad (2)$$

Как и следует из физических представлений, формулы 1 и 2 полностью идентичны. Приведенные формулы справедливы для случая, когда все вектора и составляющие находятся в плоскости вектора $T_{изм}$. При проведении работ с комплексным скважинным магнитометром-инклинометром МИ-3803М измеряются вертикальная составляющая (Z), модуль горизонтальной составляющей (H) вектора геомагнитного поля (T), магнитный азимут (A) и величина магнитной восприимчивости (æ) горных пород, слагающих стенки скважины (Астраханцев, Белоглазова, 2012).

Магнитный азимут модуля горизонтальной составляющей вычисляется по измерениям горизонтальных составляющих вектора магнитного поля в плоскости наклона скважины (H_x) и в плоскости, ортогональной ей (H_y). Магнитный азимут скважины в аномальных зонах (рудных телах) будет достаточно сильно отличаться от магнитного азимута скважины в нормальном магнитном поле. Наиболее часто все расчеты проводят в плоскости угла наклона скважины, поскольку именно эта плоскость совпадает с плоскостью геологического разреза, в которой увязываются зоны рудных пересечений. Но, в общем случае, расчет β-угла наклона и A_β-азимута границы раздела двух сред в пространстве проводят по углам наклона границы в меридиональной (β_0) и широтной (β_{90}) плоскостях (Магниторазведка, 1990) по формулам:

$$\beta_0 = \mathrm{arctg}\,\frac{\mu_e Z_{e\text{изм}} - \mu_i Z_{i\text{изм}}}{\mu_i H_{i\text{изм}} \cos A_{i\text{изм}} - \mu_e H_{e\text{изм}} \cos A_{e\text{изм}}}. \quad (3)$$

$$\beta_{90} = \mathrm{arctg}\,\frac{\mu_i Z_{i\text{изм}} - \mu_e Z_{e\text{изм}}}{\mu_i H_{i\text{изм}} \sin A_{i\text{изм}} - \mu_e H_{e\text{изм}} \sin A_{e\text{изм}}}. \quad (4)$$

$$\beta = \arccos\,\frac{1}{\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2\,\beta_0 + \mathrm{tg}^2\,\beta_{90}}}. \quad (5)$$

$$A_\beta = \arcsin\,\frac{\mathrm{tg}\,\beta_{90}}{\sqrt{\mathrm{tg}^2\,\beta_0 + \mathrm{tg}^2\,\beta_{90}}}. \quad (6)$$

Суммарное влияние систематических и случайных погрешностей измерений составляющих геомагнитного поля, магнитной восприимчивости и вычисления магнитного азимута на величину ошибки определения угла наклона границы может быть оценено по формуле (Кемниц, 1967):

$$\delta\beta = f(\beta)'_\mu\, d\mu + f(\beta)'_Z\, dZ + f(\beta)'_H\, dH + f(\beta)'_A\, dA. \quad (7)$$

Для конкретной точки вычисления угла наклона границы эта формула имеет следующее выражение (7а):

$$d\beta_{\mu,Z,H,A} = \frac{\mu_i H_i \cos A_i - \mu_e H_e \cos A_e}{(\mu_i H_i \cos A_i - \mu_e H_e \cos A_e)^2 + (\mu_e Z_e - \mu_i Z_i)^2} \times$$
$$\times \frac{(Z_e - Z_i) - (\mu_e Z_e - \mu_i Z_i)(H_i \cos A_i + H_e \cos A_e)}{(\mu_i H_i \cos A_i - \mu_e H_e \cos A_e)^2 + (\mu_e Z_e - \mu_i Z_i)^2} d\mu +$$
$$+ \frac{(\mu_i - \mu_e)(\mu_i H_i \cos A_i - \mu_e H_e \cos A_e)}{(\mu_i H_i \cos A_i - \mu_e H_e \cos A_e)^2 + (\mu_e Z_e - \mu_i Z_i)^2} dZ +$$
$$+ \frac{(\mu_e - \mu_i)(\mu_i Z_i - \mu_e Z_e)}{(\mu_i H_i \cos A_i - \mu_e H_e \cos A_e)^2 + (\mu_e Z_e - \mu_i Z_i)^2} dH +$$
$$+ \frac{(\mu_e Z_e - \mu_i Z_i)[\mu_i H_i \sin A_i - \mu_e H_e \sin A_e]}{(\mu_i H_i \cos A_i - \mu_e H_e \cos A_e)^2 + (\mu_e Z_e - \mu_i Z_i)^2} dA.$$

Проверка формул (1) и (2) на теоретических моделях показывает, что погрешность определения угла наклона границы не превышает ±1°.

Известно, что даже непрерывная регистрация измеряемых параметров реализуется путем дискретных последовательных измерений тремя блоками, расположенными на некотором расстоянии друг от друга вдоль оси скважинного прибора. Для решения задач интерпретации относительно малый разнос точек измерения вертикальной и горизонтальной составляющих геомагнитного поля не имеет принципиального значения. При расчете же угла наклона границы эта разница должна быть учтена.

Обсуждение результатов

Проверка предложенной методики расчета угла наклона границы на практическом примере проведена по результатам измерений в скважинах, вскрывших одно рудное тело. В теоретической формуле заложено условие того, что измерение внешнего и внутреннего магнитных полей произведено в одной точке. Естественно, что в реальных условиях это требование выполнено быть не может. Одна точка измерений считается внешней, следующая – внутренней. Граница между средами с различной магнитной проницаемостью μ, как правило, проводится по данным измерения величины магнитной восприимчивости (μ = 1+æ). Для контрастных сред она соответствует половине аномального значения величины магнитной восприимчивости. Для слабоконтрастных сред граница определяется конкретно в каждом случае.

На рис. 2 приведены данные измерения магнитной восприимчивости и состав-

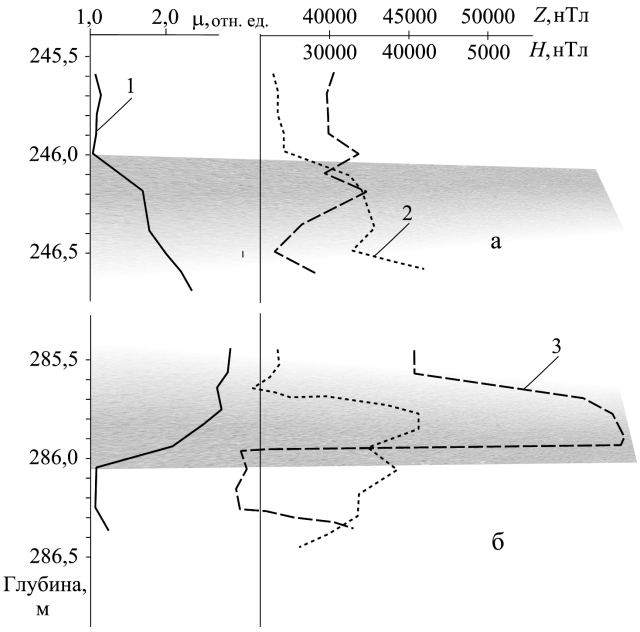

Рис. 2. Аномалия пересечения по скв. 732 на месторождении Сутарском: а – в кровле; б – подошве рудного пласта (по данным ФГУП «Дальгеофизика»); 1 – магнитная проницаемость, μ; 2 – горизонтальная составляющая, *H*; 3 – вертикальная составляющая, *Z*

Таблица. Углы наклона и азимуты простирания границ раздела, рассчитанные по результатам скважинной магнитометрии

№ скважины	Глубина, м	Угол наклона, град	Азимут простирания, град
733	139,5	67,7	44,7
	180,5	73,8	81,2
732	246,0	61,9	74,1
	286,2	73,1	75,2

ляющих напряженности геомагнитного поля в кровле (а) и подошве (б) рудного пласта по скв. 732. За границу двух сред принимаются точки на глубинах 246,0 и 286,2 м. Для расчетов углов наклона границ используются результаты измерений в точках на глубинах 246,1 и 286,1 м (среда с повышенной магнитной восприимчивостью) и в точках – 245,9 и 286,3 м (немагнитная среда).

По аналогичной методике выполнены расчеты углов наклона границ в скв. 733 на глубинах 139,5 и 180,5 м.

Результаты расчетов приведены в таблице.

На рис. 3 приведены результаты расчетов элементов залегания рудных тел.

Оценка погрешности расчета угла наклона границы выполнена для точки 180,5 м по формуле (7а) при погрешности измерений величины магнитной восприимчивости ±5 %, составляющих геомагнитного поля ±500 нТл и магнитного азимута ±5°. Полученная погрешность расчета составила ±2,3°.

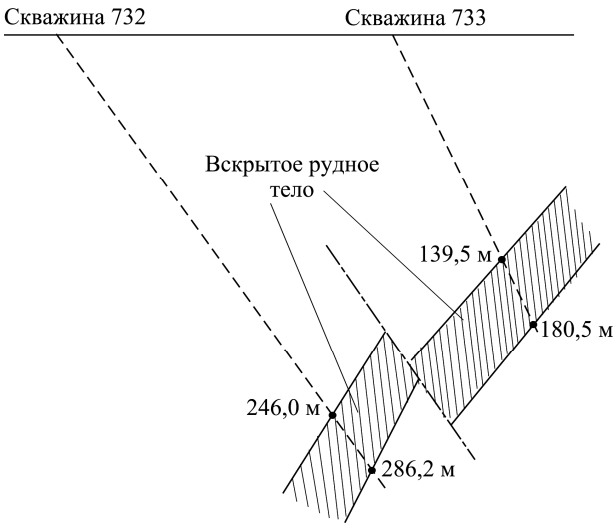

Рис. 3. Результаты расчетов элементов залегания рудных тел: пунктиром обозначена проекция скважины; штрихпунктиром – предполагаемое тектоническое нарушение

При построении модели рудного тела полученная информация позволяет предположить наличие между скважинами тектонического нарушения или плойчатой структуры рудного тела. Критерием объективности рассчитанных углов наклона границ может служить совпадение параметров аномалии наземной магнитной съемки с предполагаемым выходом рудного тела на земную поверхность.

Возможности вычисления элементов залегания границ двух сред по данным скважинной магнитометрии при изучении вкрапленных руд исследованы на примере буровзрывных скважин Качканарского ГОКа.

На рис. 4 приведен пример регистрации информации с комплексным прибором МИ-3803.

Измерения были выполнены в 11-и скважинах на одном из отрабатываемых блоков. Учитывая, что глубина скважин не более 17 м и они практически вертикальны, азимут модуля горизонтальной составляющей определяется без жесткой привязки к магнитному меридиану. При расчетах угла наклона границы использовалась условная привязка к меридиональной плоскости.

По вычисленным данным построены параметры границ раздела в плане на глубинах 5, 10 и 15 м (рис. 5), откуда видно, что явной пространственной связи азимутов простирания углов падения с распределением магнитного поля (вертикальной и горизонтальной составляющих) не устанавливается.

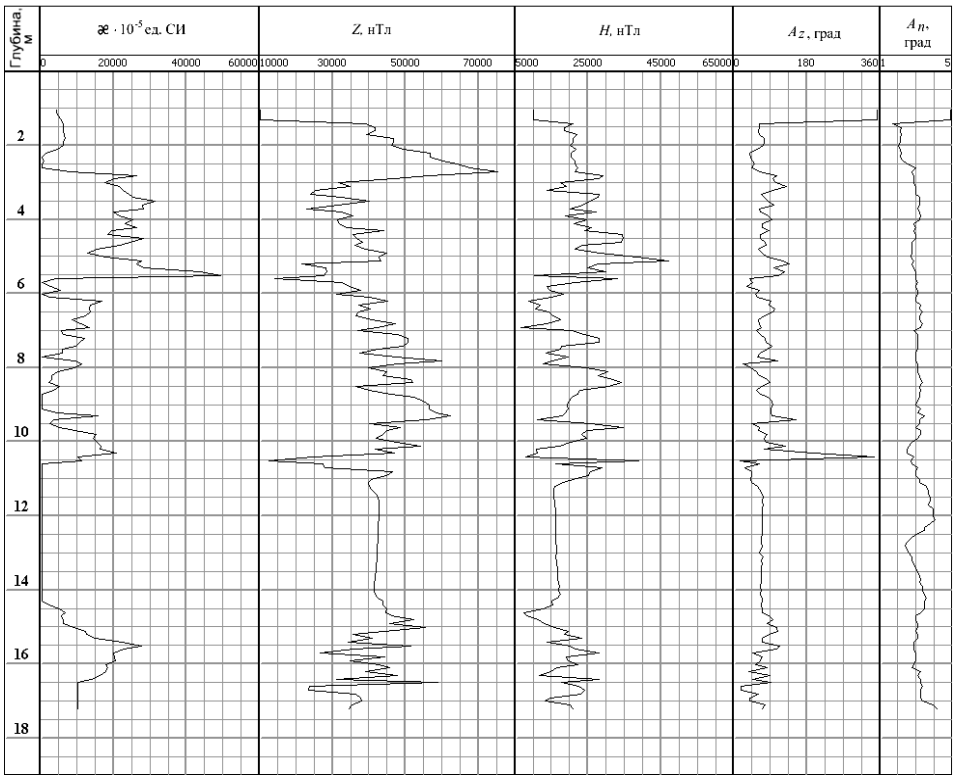

Рис. 4. Результаты скважинной магнитометрии в буровзрывной скважине КГОКа

На рис. 6 и 7 приведены гистограммы распределения углов падения и азимутов углов падения выделенных границ. Наиболее часто встречаются субвертикальное

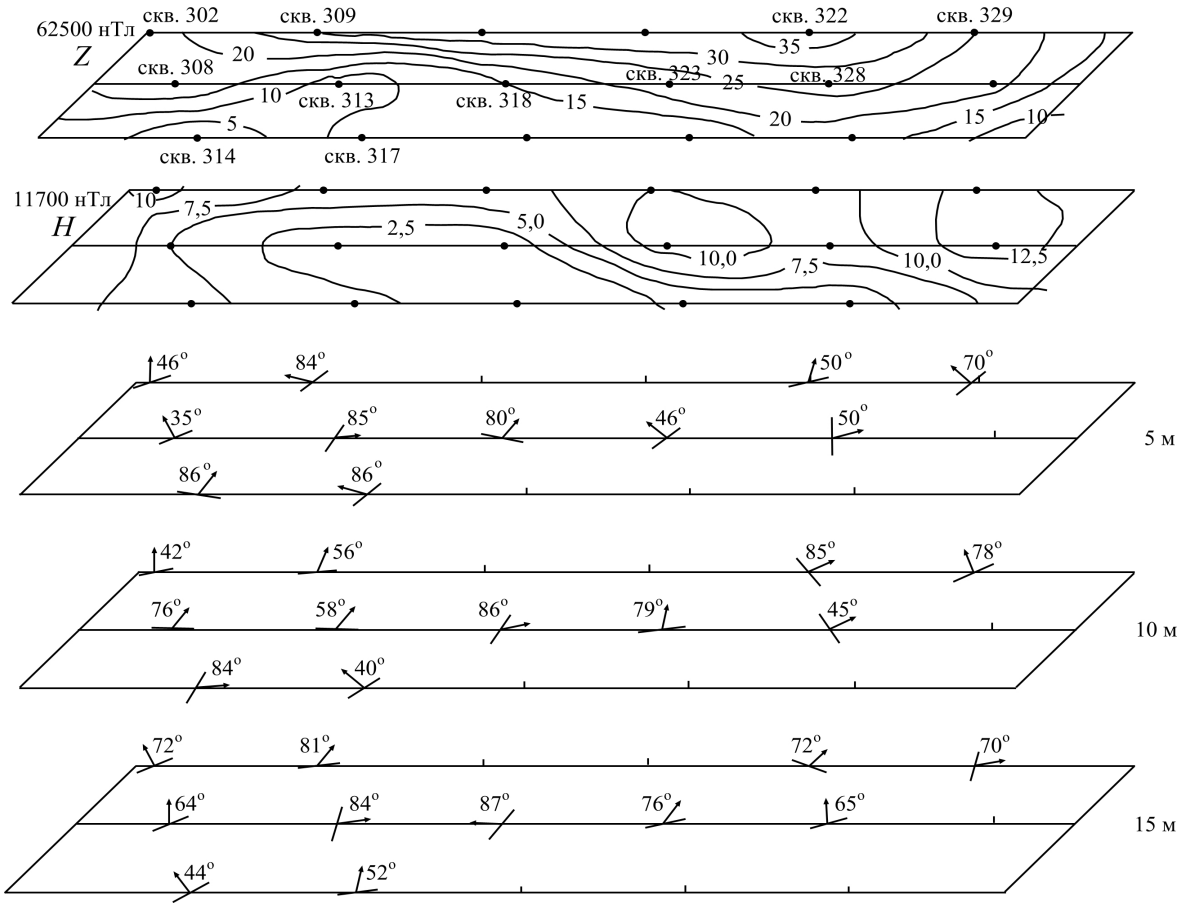

Рис. 5. Наземная трехкомпонентная магнитная съемка (выполнена А.Г. Вдовиным) и глубинное распределение вычисленных параметров границ разделов

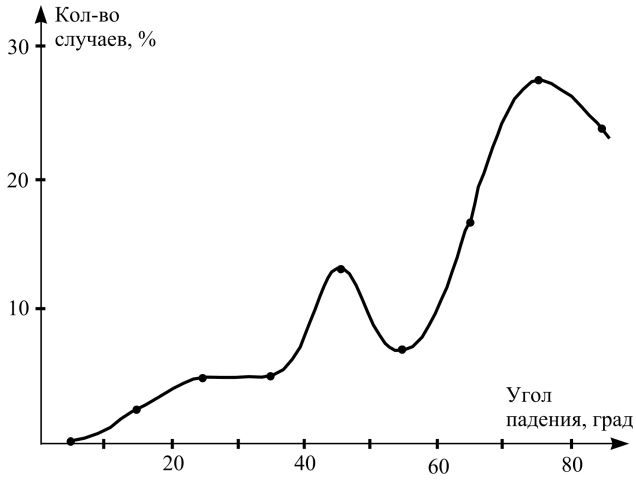

Рис. 6. Распределение углов падения

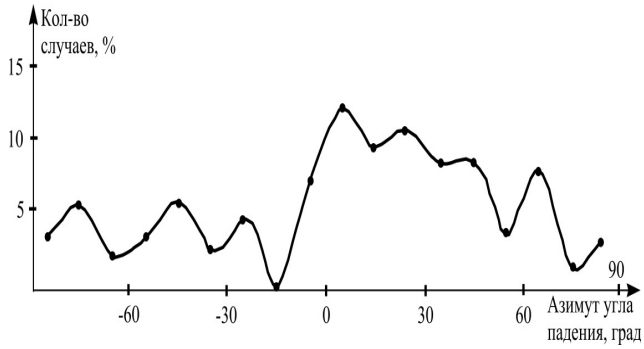

Рис. 7. Распределение азимутов углов падения

падение пластов (70–83°) и азимуты границ северо-западного направления (0–60°).

По одному из профилей построен вертикальный разрез, на котором приведены результаты увязки измеренной величины магнитной восприимчивости, пропорциональной содержанию магнетитового железа, между скважинами с учетом инфор-

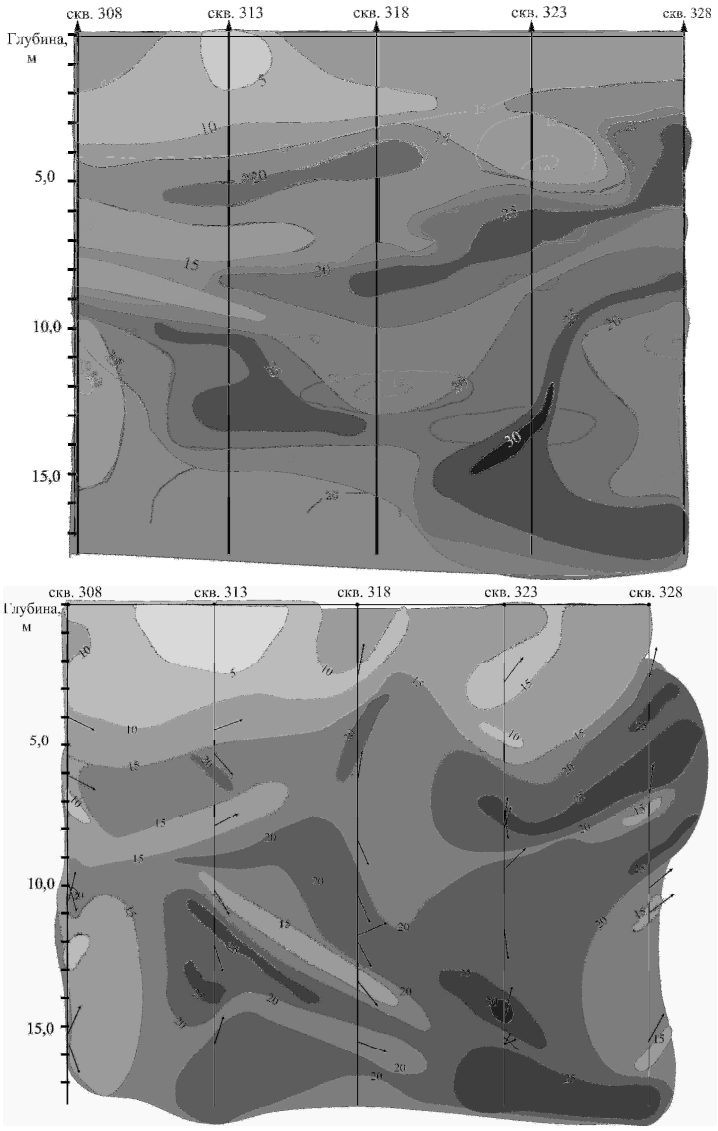

Рис. 8. Распределение содержания магнетитового железа по профилю: вверху – без учета углов наклона; внизу – с учетом углов наклона границ; цифрами обозначено содержание магнетитового железа, %

мации об углах наклона границ и без неё (рис. 8).

При детальной селективной добыче полезного компонента, если его распределение контролируется магнитной минерализацией, эта информация может быть использованной.

Заключение

Таким образом, по результатам измерения в скважине трех компонент геомагнитного поля и величины магнитной восприимчивости возможно определение элементов залегания границы раздела магнитных сред без привлечения информации о нормальном магнитном поле. Погрешность этого определения зависит от погрешностей измерения используемого скважинного трехкомпонентного магнитометра.

В случае контрастных и протяженных рудных тел полученная информация может оказать существенную помощь при построении моделей рудных полей и рудных узлов. При добыче вкрапленных руд, когда отсутствует явно выраженный переход «вмещающая порода–руда», такая информации может быть использована при селективной отгрузке отбитой рудной массы, что может значительно снизить экономические затраты при дальнейшей переработке.

Работа выполнена при поддержке междисциплинарного проекта 12-М-23457-2041 по УрО РАН.

Литература

Астраханцев Ю.Г., Белоглазова Н.А. Комплексная магнитометрическая аппаратура для исследования сверхглубоких и разведочных скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 120 с.

Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968. 488 с.

Кемниц Ю.В. Теория ошибок измерений. М.: Недра, 1967. 175 с.

Магниторазведка. Справочник геофизика / Под ред. В.Е. Никитского, В.С. Глебовского. М.: Недра, 1990. 470 с.

Пономарев В.Н., Бахвалов А.Н. Использование измерений внутреннего магнитного поля для определения элементов залегания пластообразных тел // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 3. С. 360–369.

Пономарев В.Н., Бахвалов А.Н. Интерпретация скачка магнитного поля, наблюдаемого в скважине при переходе через границу намагниченного тела // Прикладная геофизика. М., 1969. Вып. 54. С. 111–119.

Смайт В. Электростатика и электродинамика / Пер. с анг. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. 604 с.