УДК 550.838

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Аннотация. Предложена методика расчета намагниченности горных пород по результатам трехкомпонентных измерений геомагнитного поля в скважинах. Проведен анализ поведения внутреннего магнитного поля пласта в зависимости от выбора нормального поля в точке расчета и соотношений вертикальной и радиальной мощности вскрытого тела и диаметра скважины.

Магнитная минерализация, намагниченность горных пород, скважинная магнитометрия, трехкомпонентные измерения магнитного поля, учет влияния скважины.

ON THE DETERMINATION OF MAGNETIZATION ROCK ON THE RESULTS OF THREE-COMPONENT DOWNHOLE MEASUREMENTS

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

Abstract. The magnetization of rocks calculated method using the results of the three-component of the geomagnetic field measurements in boreholes was proposed. The behavior of the internal magnetic field of the bed analysis was made. It depends on the choice of the normal field at the point of calculation and the relations of vertical and radial bed thickness and borehole diameter.

Magnetic mineralization, magnetization of rocks, borehole magnetometry, three-component magnetic field measurements, accounting for the effects of borehole.

Введение

Скважинная магниторазведка является одним из наиболее эффективных методов при поисках, разведке и отработке месторождений полезных ископаемых, связанных с магнитной минерализацией. Возможность получения информации о намагниченности (полной, остаточной и индуцированной) горных пород в естественном залегании значительно повышает ее эффективность при изучении зональности контактово-измененных пород и процессов рудогенеза, выделении типов руд, связанных как с разновременными генерациями магнитной минерализации, так и с технологическими особенностями при последующем обогащении, а также при построении палеомагнитных реконструкций (Магниторазведка, 1990; Иголкина, 2002).

В настоящее время для вычисления намагниченности горных пород, вскрытых скважиной, применяется методика, предложенная В.Н. Пономаревым и А.Н. Бахваловым (Пономарев, Бахвалов, 1975) с дополнениями, внесенными в работах (Бахвалов и др., 1992; Иголкина, Белоглазова, 1996). Основное положение этой методики сводится к тому, что по кривой магнитной восприимчивости и кривым горизонтальной и вертикальной составляющих геомагнитного поля выделяются интервалы магнитных пород в разрезе скважины, в пределах которых магнитное поле можно считать постоянным. Мощность этих участков может быть сколь угодно мала, вплоть до шага дискретизации зарегистрированных кривых (0,1 м).

Но прежде чем определиться с методикой расчета намагниченности, необходимо оценить поведение внутреннего магнитного поля в зависимости от соотношений видимой мощности вскрытого тела, его горизонтальной мощности и диаметра скважины. В данном случае рассмотрим эти вопросы на примере горизонтального пласта, вскрытого вертикальной скважиной.

Методика расчета

Расчет внутреннего индуцированного магнитного поля от тел конечных размеров приведен в работе (Филиппычева, Савицкий, 1973). Полученные авторами формулы можно рассматривать как алгоритмы для вычисления составляющих напряженности магнитного поля по оси цилиндрической полости при эксцентричном положении скважинного снаряда в скважине.

Во всех работах при вычислении магнитного потенциала U от однородно намагниченного тела исходным является уравнение:

$$U = -\left[\vec{I},\ \mathrm{grad}\int_V \frac{dV}{R}\right],$$

где $\vec{I}$ – вектор намагниченности тела; dV – элементарный объем; R – расстояние от точки наблюдения до диполя.

Ниже приведены уравнения для вертикальной (Z) и горизонтальных (X, Y) составляющих магнитного поля от элементарного диполя с координатами x y z_d (Колюбакин, Лапина, 1960):

$$dZ/m = \frac{\left[2(z_d - z_0)^2 - x^2 - y^2\right]\cos\theta\cos\beta}{\left[x^2 + y^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}} + \frac{3x(z_d - z_0)\sin\theta\cos\beta + 3y(z_d - z_0)\sin\beta}{\left[x^2 + y^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}};$$

$$dX/m = \frac{3x(z_d - z_0)\cos\theta\cos\beta + 3xy\sin\beta}{\left[x^2 + y^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}} + \frac{\left[2x^2 - y^2 - (z_d - z_0)^2\right]\sin\theta\cos\beta}{\left[x^2 + y^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}};$$

$$dY/m = \frac{3y(z_d - z_0)\cos\theta\cos\beta}{\left[x^2 + y^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}} + \frac{3xy\sin\theta\cos\beta - \left[x^2 - 2y^2 + (z_d - z_0)^2\right]\sin\beta}{\left[x^2 + y^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}},$$

где m – магнитный момент диполя, равный $\partial V{\cdot}I$; β и θ – углы ориентировки вектора намагниченности в пространстве.

В цилиндрических координатах, при $m = I\rho\, d\rho\, d\varphi\, dz$, эти уравнения имеют вид:

$$dZ/m = \frac{\left[2(z_d - z_0)^2 - \rho^2\right]\cos\theta\cos\beta}{\left[\rho^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}} + \frac{3\rho(z_d - z_0)\cos\varphi\cos\beta\sin\theta + 3\rho(z_d - z_0)\sin\varphi\sin\beta}{\left[\rho^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}};$$

$$dX/m = \frac{3\rho(z_d - z_0)\cos\varphi\cos\theta\cos\beta + 3\rho^2\cos\varphi\sin\varphi\sin\beta}{\left[\rho^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}} + \frac{\left[2\rho^2\cos^2\varphi - \rho^2\sin^2\varphi - (z_d - z_0)^2\right]\sin\theta\cos\beta}{\left[\rho^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}};$$

$$dY/m = \frac{3\rho(z_d - z_0)\sin\varphi\cos\theta\cos\beta}{\left[\rho^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}} + \frac{3\rho^2\sin\varphi\cos\varphi\sin\theta\cos\beta}{\left[\rho^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}} - \frac{\left[\rho^2\cos^2\varphi - 2p^2\sin^2\varphi + (z_d - z_0)^2\right]\sin\beta}{\left[\rho^2 + (z_d - z_0)^2\right]^{5/2}}.$$

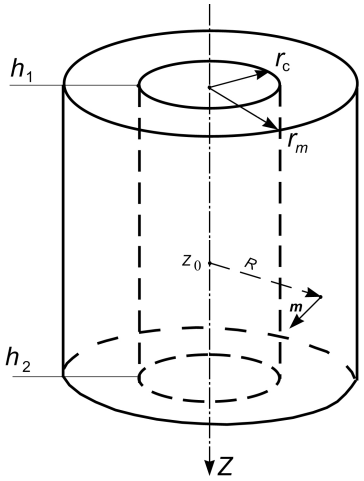

Рис. 1. Модель однородно намагниченного пласта, пересеченного скважиной

При интегрировании по объему цилиндра (рис. 1), формулы для расчетов магнитного поля по оси скважины радиусом r_c от горизонтального, однородно намагниченного бесконечного пласта мощностью $2b = h_2 - h_1$ принимают вид:

$$Z = -2\pi I\cos\theta\cos\beta \times \left[\frac{h_2 - z_0}{\left[r_c^2 + (h_2 - z_0)^2\right]^{1/2}} - \frac{h_1 - z_0}{\left[r_c^2 + (h_1 - z_0)^2\right]^{1/2}}\right] = -2\pi I_Z G;$$

$$X = \pi I \sin\theta \cos\beta G_0 = \pi I_X G_0;$$

$$Y = \pi I \sin\beta G_0 = \pi I_Y G_0;$$

$$H = \pi I \sqrt{\sin^2\theta \cos^2\beta + \sin^2\beta}\, G_0 = \pi I_H G_0,$$

где G_0 – геометрический фактор горизонтального, бесконечного по простиранию пласта, зависящий от его вертикальной мощности и радиуса скважины; I_Z – вертикальная составляющая естественной намагниченности горных пород; I_X и I_Y – меридиональная и широтная составляющие горизонтальной составляющей (I_H) естественной намагниченности горных пород.

Расчет магнитного поля от горизонтального, однородно намагниченного пласта, ограниченного по простиранию с радиальной мощностью $d_r = r_c - r_m$ производился по формулам:

$$Z = -2\pi I \cos\theta \cos\beta \times$$
$$\times \left[\frac{h_2 - z_0}{\left[r_c^2 + (h_2 - z_0)^2\right]^{1/2}} - \frac{h_1 - z_0}{\left[r_c^2 + (h_1 - z_0)^2\right]^{1/2}} - \right.$$
$$\left. - \frac{h_2 - z_0}{\left[r_m^2 + (h_2 - z_0)^2\right]^{1/2}} + \frac{h_1 - z_0}{\left[r_m^2 + (h_1 - z_0)^2\right]^{1/2}} \right] =$$
$$= -2\pi I_Z (G_0 - G_m);$$

$$X = \pi I \sin\theta \cos\beta (G_0 - G_m) = \pi I_X (G_0 - G_m);$$

$$Y = \pi I \sin\beta (G_0 - G_m) = \pi I_Y (G_0 - G_m);$$

$$H = \pi I \sqrt{\sin^2\theta \cos^2\beta + \sin^2\beta} (G_0 - G_m) =$$
$$= \pi I_H (G_0 - G_m),$$

где G_m – геометрический фактор, зависящий от радиуса скважины, вертикальной (2b) и радиальной мощностей пласта (d_r).

При интегрировании по объему цилиндра, ограниченного по высоте и простиранию (см. рис. 1), уравнения для расчета магнитного поля по оси скважины соответствуют уравнениям (8) и (9) работы (Филиппычева, Савицкий, 1973), а при интегрировании по объему полупространства – уравнениям из работы (Пономарев, Захарченко, 1958).

Результаты расчетов геометрических факторов «мощного» и «тонкого» пластов для различных ситуаций приведены на рис. 2–5. «Мощным» условно принят пласт, вертикальная мощность которого превосходит радиус скважины в 20 раз, а «тонким» – пласт с соотношением $2b/r_c = 1$.

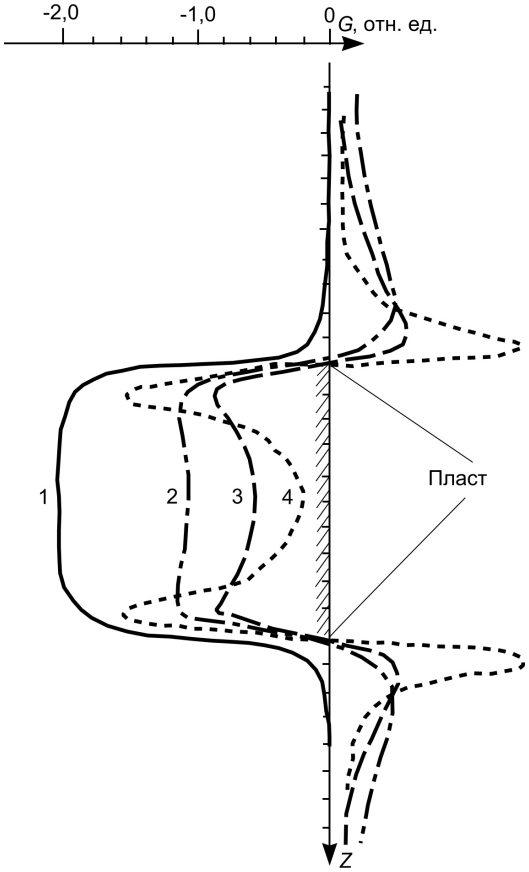

Рис. 2. Зависимость геометрического фактора «мощного» пласта от его радиальной мощности: 1: $d_r = 50\ r_c$; 2: $d_r = 9{,}5\ r_c$; 3: $d_r = 5{,}5\ r_c$; 4: $d_r = 0{,}5\ r_c$

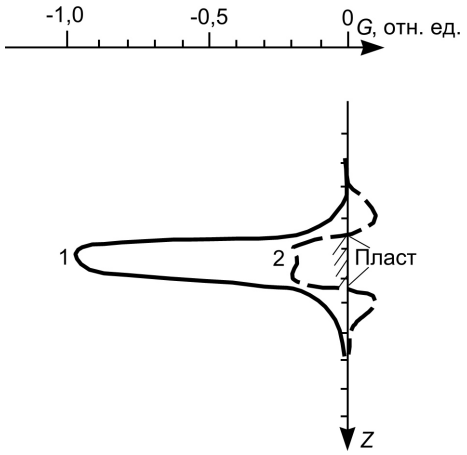

Рис. 3. Зависимость геометрического фактора «тонкого» пласта от его радиальной мощности: 1: $d_r = 50\ r_c$; 2: $d_r = 0{,}5\ r_c$

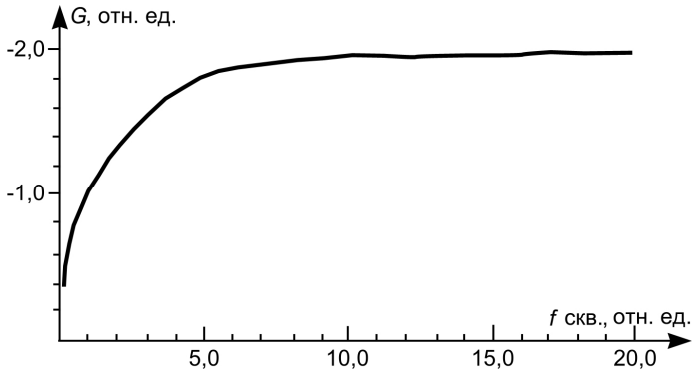

Рис. 4. Зависимость геометрического фактора G от $f = 2b/r_c$

Таким образом, по форме зарегистрированных кривых составляющих геомагнитного поля можно проводить разделение подсеченных скважинной намагниченных тел по их мощности как вертикальной, так и радиальной. Например, тела с малой радиальной мощностью отмечаются кривыми 4-го типа с большим амплитудным минимумом на уровне центра тела (см. рис. 2). Расчет намагниченности таких тел может быть реализован только с учетом информации об их геометрии. Введение соответствующих поправок необходимо и при расчете намагниченности «тонких» тел, когда вертикальная мощность пласта меньше трёх радиусов скважины (см. рис. 4). В результаты измерений геомагнитного поля в скважинах большого диаметра также требуется введение соответствующей поправки (см. рис. 5).

Полученная информация позволяет сделать вывод, что вычисление намагниченности горных пород, вскрытых скважиной, при аппроксимации их сколь угодно тонкими пластами, может быть некорректным.

При проведении скважинной магниторазведки измеряют не только внешнее магнитное поле, но и поле внутри тела. Исходными данными для вычисления намагниченности горных пород в естественном залегании являются значения магнитной восприимчивости, вертикальной составляющей геомагнитного поля, модуля и азимута его горизонтальной составляющей, которые могут быть получены при работе с комплексным скважинным магнитометром – инклинометром типа МИ-3803 (Астраханцев, Белоглазова, 2012).

Естественная намагниченность горных пород является векторной суммой индуцированной и остаточной намагниченностей $\vec{I} = \vec{I}_r + \vec{I}_i$, при этом: $I_{iZ} = æ\, Z_a$ и $I_{iH} = æ\, H_a$ – вертикальная и горизонтальная составляющие индуцированной намагниченности горных пород; æ – магнитная восприимчивость горных пород; Z_a и H_a – аномальные значения вертикальной и горизонтальной составляющих геомагнитного поля; I_{rZ} и I_{rH} – вертикальная и горизонтальная составляющие остаточной намагниченности горных пород.

Так как при расчетах намагниченности используются соотношения $Z_а = Z_{изм} - Z_0$ и $H_а = H_{изм} - H_0 \cos A_{Hизм}$, то основной про-

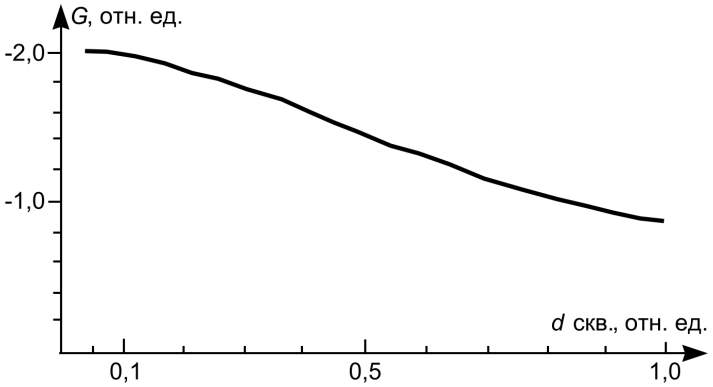

Рис. 5. Зависимость геометрического фактора «мощного» пласта ($2b/r_c = 20$) от радиуса скважины (r_c)

блемой является выбор значений составляющих нормального геомагнитного поля (Z_0 и H_0).

Азимут измеренной горизонтальной составляющей учитывается также и при вычислении остаточной горизонтальной намагниченности $I_{rH} = I_H - I_{iH} \cos A_{H\text{изм}}$.

Результаты

В качестве примера приводятся расчеты полной естественной, остаточной и индуцированной намагниченностей по результатам измерений в буровзрывных скважинах Западного, Северного и Главного карьеров Качканарского ГОКа (табл. 1).

Таблица 1. Результаты вычисления полной естественной, остаточной и индуцированной намагниченностей по измерениям в буровзрывных скважинах Качканарского ГОКа

№ п/п	Интервал, м	Азимут, град.	Естественная намагниченность		Остаточная намагниченность		Модуль индуцированной намагниченности, А/м	Фактор Кенигсбергера
			модуль, А/м	угол, град.	модуль, А/м	угол, град.		
Западный карьер, эталонная скважина								
1	2,25 – 5,5	129,6	3,88	25,3	26,8	85,7	28,8	0,92
2	5,75 – 7,5	85,9	3,33	31,2	14,6	88,6	17,01	0,88
3	7,75 – 10.0	67,0	3,02	30,1	12,7	89,5	4,4	0,87
4	10,25 – 11,0	69,6	2,59	30,1	8,5	-87,2	9,9	0,86
5	11,5 – 12.5	136,6	4,48	20,1	11,9	-81,9	13,5	0,87
6	12,75 – 13,7	84,4	3,90	29,5	17,9	87,7	19,5	0,92
7	14,0 – 15,75	86,7	3,31	23,5	22,5	81,0	24,2	0,92
8	16,0 – 18,0	75,6	2,90	29,0	19,6	85,6	21,3	0,91
9	18,25 – 20,75	80,5	3,13	29,0	14,3	89,7	15,8	0,90
10	21,0 – 23,5	83,6	3,00	22,7	12,5	-89,4	13,9	0,90
11	23,75 – 25,0	86,9	3,37	16,3	8,6	-80,6	9,7	0,89
12	25,25 – 28,0	87,3	3,06	23,6	14,4	89,2	15,9	0,90
Северный карьер, скв. 200								
1	2,5 – 3,75	287,5	2,35	72,4	10,6	80,6	12,9	0,82
2	4,5 – 7,0	227,5	3,50	29,3	9,0	-83,6	19,8	0,83
3	7,25 – 8,0	230,8	3,54	27,8	14,7	89,9	16,7	0,88
4	9,25 – 10,5	253,2	2,82	25,1	10,1	-87,7	14,5	0,88
5	11,5 – 13,25	277,7	2,64	33,4	14,2	86,7	15,9	0,89
6	13,5 – 16,5	257,3	3,04	34,3	10,1	-88,5	12,1	0,84
7	16,75 – 17,7	175,1	4,38	19,3	3,84	-20,2	2,82	1,36
Главный карьер, скв. 447								
1	2,25 – 3,75	63,9	2,95	58,1	5,9	-85,0	8,11	0,72
2	4,25 – 5,5	60,8	2,71	58,0	3,07	-69,9	4,84	0,64
3	6,0 – 8,0	91,4	3,58	57,9	11,6	-89,6	14,2	0,82
4	8,25 – 10,25	93,0	2,56	57,8	6,9	-84,3	8,30	0,84
5	10,75 – 11,5	28,8	1,81	58,4	15,3	80,5	17,1	0,89
6	11,75 – 14,0	96,0	2,77	57,9	8,3	-87,0	10,2	0,81
7	14,25 – 15,5	43,4	2,12	57,9	8,0	89,1	9,47	0,84
8	16,0 – 17,75	79,7	2,44	57,9	7,0	-87,1	8,55	0,81

На рис. 6 и 7 приведены в вертикальном разрезе планы изодинам полной естественной и остаточной намагниченностей на одном из блоков Главного карьера.

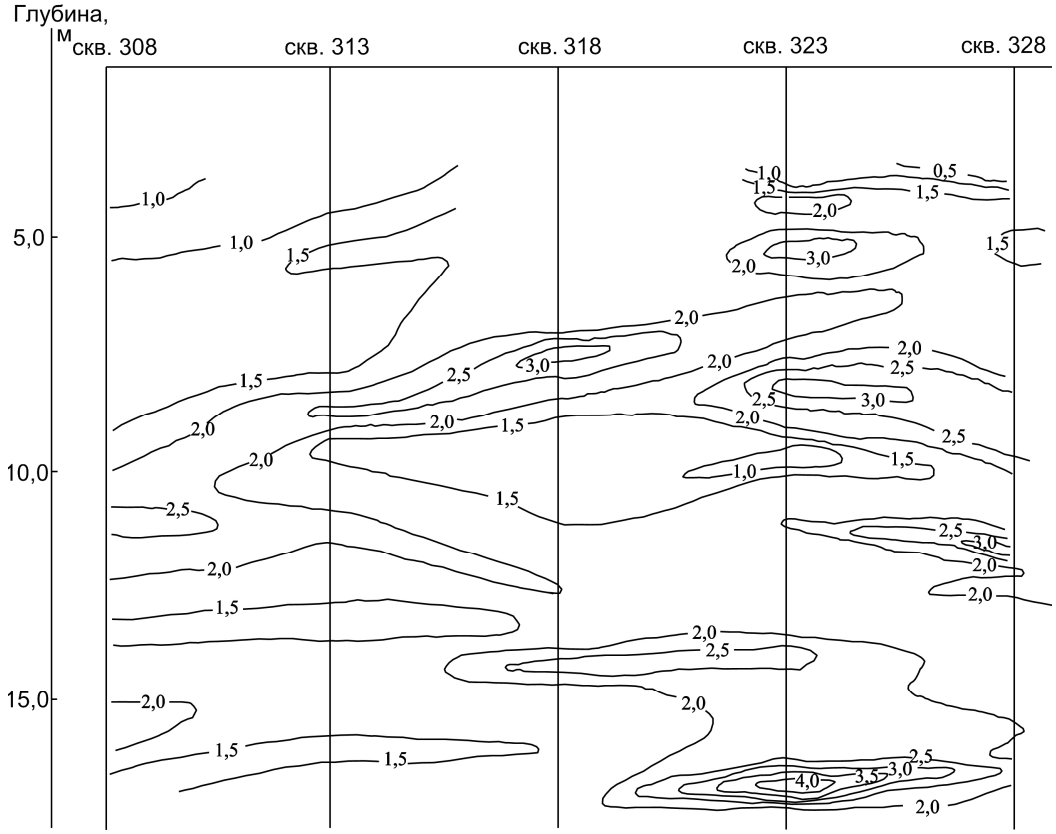

Рис. 6. План изодинам полной естественной намагниченности, А/м

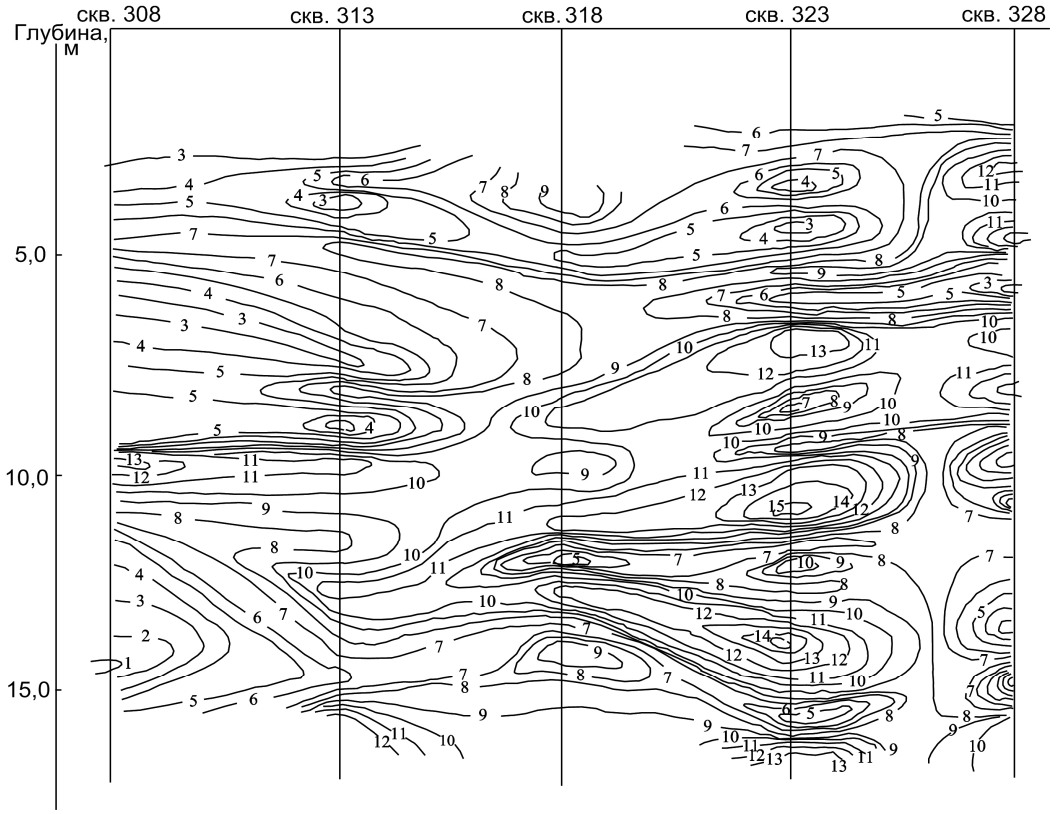

Рис. 7. План изодинам остаточной естественной намагниченности, А/м

Анализ полученной информации позволяет установить, что на Главной, Западной и Северной залежах Гусевогорского месторождения величина остаточной намагниченности практически сопоставима с индуцированной (фактор Кенигсбергера меняется от 0,64 до 1,36, среднее значение 0,85) и имеет обратное современному магнитному полю направление. При расчетах использованы параметры нормального геомагнитного поля Z_0 = 62500 нТл и H_0 = 12000 нТл, выбранные по результатам трехкомпонентной наземной магнитной съемки на одном из буровзрывных блоков Главного карьера, выполненной прибором типа МИПА-01 (Институт геофизики УрО РАН).

Для оценки влияния на результаты расчетов уровня нормального поля в табл. 2 приведены результаты расчетов при параметрах «нормального поля», соответствующих измеренным составляющим геомагнитного поля при пересечении скважиной немагнитных пород (второй вариант) и параметрах, снятых с карт нормального магнитного поля для этого района (третий вариант).

Анализ полученных результатов показывает, что выбор параметров нормального поля оказывает существенное влияние на соотношение вычисленных индуцированной и остаточной намагниченностей, а также на определение направления полной естественной намагниченности.

Заключение

Полученная информация позволяет сделать вывод: вычисление намагниченности по результатам скважинной магнитометрии целесообразно проводить по интервалам, вертикальная мощность которых составляет три и более диаметра скважины. При таком подходе влияние немагнитной полости скважины на расчеты сводится к минимуму.

Предлагаемая методика позволяет по результатам трехкомпонентных измерений геомагнитного поля в скважинах вычислить полную естественную, остаточную и индуцированную намагниченности и их направления. Существенной проблемой

Таблица 2. Рассчитанные индуцированная (I_i, А/м), остаточная (I_r, А/м) и естественная (I, А/м) намагниченности, наклонение естественной намагниченности (θ_I) и фактора Кенигсбергера (Q) при различных значениях нормального магнитного поля

№ скв.	Первый вариант Z_0 = 62 500 и H_0=12 000 нТл					Второй вариант Z_0 = 42 000 и H_0=17 000 нТл					Третий вариант Z_0 = 56 000 и H_0=14 000 нТл				
	I_i	I_r	I	θ_I	Q	I_i	I_r	I	θ_I	Q	I_i	I_r	I	θ_I	Q
446	10,7	8,6	4,1	28	0,8	7,8	7,4	3,7	10	0,9	9,7	8,7	3,9	23	0,8
	12,8	11,2	4,2	19	0,8	9,1	10,7	4,4	1,5	1,1	11,6	11,9	4,2	13	1,0
	2,1	4,0	4,7	23	1,8	1,5	5,3	4,9	7	3,4	1,0	4,9	4,8	17	2,5
	14,1	13,1	2,8	14	0,9	10,0	10,3	2,8	-11	1,0	12,8	12,4	2,8	6	0,9
	11,6	10,1	4,9	18	0,8	8,2	8,9	4,7	3	1,0	10,5	10,2	4,8	14	0,9
	6,5	4,3	2,7	51	0,6	4,6	3,5	1,5	31	0,7	5,9	4,1	2,3	47	0,6
	23,9	22,3	3,7	17	0,9	17,0	17,5	3,9	-2	1,0	21,7	21,3	3,8	11	0,9
162	0,4	3,7	3,5	23	8,3	0,3	3,9	3,9	3	12,5	0,4	3,8	3,8	18	9,3
	1,2	3,1	3,0	26	2,4	0,9	3,5	3,6	3	3,9	1,1	3,3	3,3	19	2,8
	3,0	4,3	3,6	20	1,4	2,1	5,0	4,0	0,5	2,3	2,7	4,6	3,9	13	1,6
	8,0	8,7	5,3	18	1,0	5,7	8,4	5,6	4	1,4	7,2	8,6	5,6	13	1,1
	0,4	3,3	3,1	22	6,8	0,3	3,6	3,5	0,2	10,4	0,4	3,4	3,4	15	7,7
	7,6	8,0	4,3	18	1,0	5,4	7,8	4,8	1,5	1,4	6,9	8,0	4,6	12	1,1

является выбор нормального поля, решение которой определяется конкретной ситуацией.

Работа выполнена в рамках Междисциплинарного проекта фундаментальных исследований Уральского отделения РАН № 12-М-23457-2041 «Освоение недр Земли: перспективы расширения и комплексного освоения рудной минерально-сырьевой базы горно-металлургического комплекса Урала (титаномагнетитовые руды)». А также при финансовой поддержки от правительства Свердловской области и Российского фонда фундаментальных исследований по проекту РФФИ-Урал № 13-05-96019.

Литература

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

Бахвалов А.Н., Иголкина Г.В., Портнов В.С. Определение намагниченности пород в скважине по результатам измерения магнитного поля и восприимчивости // Геология и разведка. Изв. вузов. 1992. № 2. С. 116–121.

Иголкина Г.В. Скважинная магнитометрия при исследовании сверхглубоких и глубоких скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 215 с.

Иголкина Г.В., Белоглазова Н.А. Определение намагниченности пород по измерениям внутреннего магнитного поля и магнитной восприимчивости в сверхглубоких скважинах // Теория и практика геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Междунар. конф. Тез. докл. Воронеж: Квадрат, 1996. С. 86–87.

Колюбакин В.В., Лапина М.И. Обзор способов решения прямой и обратной задач магнитной разведки. М.: АН СССР, 1960. 356 с. (Труды Института физики Земли. Вып. 13 (180)).

Магниторазведка: Справочник геофизика / Под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 470 с.

Пономарев В.Н., Бахвалов А.Н. Методика магнитных измерений в скважинах и интерпретация результатов // ЭИ. Сер. региональная, разведочная и промысловая геофиз. М.: ВИЭМС, 1975. Вып. 13. С. 25–56.

Пономарев В.Н., Захарченко В.Ф. Использование измерений магнитного поля в шурфах для определения намагниченности горных пород в условиях их естественного залегания // Разведка и охрана недр. 1958. № 9. С. 33–35.

Филиппычева Л.Г., Савицкий А.П. К расчету внутреннего индуцированного поля тел конечных размеров // Электромагнитные и магнитные методы исследования скважин: Сборник. Л., 1973. С. 76–82. (Труды ВИРГ. Вып. 17).