

Проверено 1939 г.

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ СССР
ПРИ СНК СОЮЗА ССР

Инв. № 550.3
Т-78
Инв. № 58360

Березовый
1939

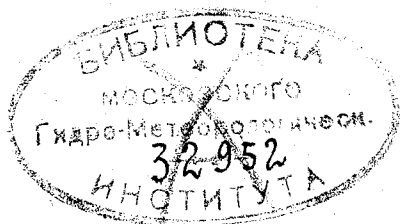
ТРУДЫ ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Выпуск 17

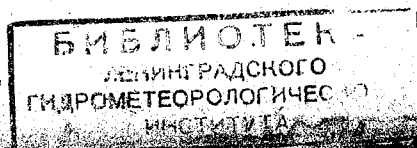
Под общей редакцией
проф. П. Н. ТВЕРСКОГО

ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ

Под редакцией
проф. Б. П. ВЕЙНБЕРГА



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД 1938 МОСКВА



88845

M-JI-501

GENERAL OFFICE OF THE HYDROMETEOROLOGICAL SERVICE
OF USSR

TRANSACTIONS
OF THE CENTRAL GEOPHYSICAL OBSERVATORY

FASC. 17

Editor in chief prof. *P. N. Tverskoy*

OF TERRESTRIAL MAGNETISM

Editor prof. *B. P. Weinberg*

ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА ФАРАДЕЯ ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИЛОВЫМИ ЛИНИЯМИ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МАГНИТНЫХ СЪЕМОК

Распределение элементов земного магнетизма на том или ином участке земной поверхности можно считать известным лишь тогда, когда мы знаем не только распределение их на самой земной поверхности, но и на практически любой высоте над нею или глубине под нею.

Знание распределения элементов на различных высотах и глубинах необходимо для: 1) приведения к земной поверхности определений магнитных элементов, которые будут делаться для магнитных съемок на самолетах и дирижаблях, переход к чему уже намечается; 2) для учета возможного влияния сильных аномалий при полетах аэропланов и дирижаблей; 3) для истолкования результатов магнитометрических съемок и сопоставления их с геологическим строением местности.

Распределение элементов земного магнетизма вне земной поверхности можно определить либо А) сравнением непосредственных определений над землей (на самолете или на специально устроенной башне) или под землей (в шахте, шурфе) со значениями элементов земного магнетизма на поверхности земли, либо В) теоретическим путем, основанным на известном нам распределении их на земной поверхности.

А. Непосредственные определения элементов земного магнетизма на различной высоте дают только значения градиентов X , Y и Z по вертикали и, в силу трудности производства таких определений, связанной с устройством специальных башен или треног или с посылкой аэроплана, не могут дать полную картину изменения магнитного поля в пространстве. Определения в горных выработках, в тех случаях, когда горные выработки не входят в рудное тело, вызывающее аномалию, могут также дать градиенты по вертикали. Но в тех случаях, когда выработки входят в рудное тело, вызвавшее аномалию, или пересекают его, закон изменения элементов земного магнетизма становится очень сложным. Как пример, приведу результаты произведенных мной определений в одном из шурфов на месторождении магнитного железняка (1-й Северный рудник на Северном Урале):

Таблица 1

Глубина z (м)	Аномальные составляющие (в долях $H_0 = 0,16$)			Геологический разрез
	X_a	Y_a	Z_a	
—1,5 (над шур- фом)	+0,21	+0,14	+0,40	С поверхности до глубины 3,1 м — валуны магнетита с глиной От 3,1 м до 14 м — глина
6	—0,16	+0,04	—0,21	
12	+0,15	+0,12	—0,14	

Из приведенных значений видно, что слой глины с магнетитом вызывает как положительное значение аномальных составляющих на поверхности, так и отрицательное на глубине, и, конечно, по этим определениям внизу совершенно невозможно определить градиенты вверх.

Определения на самолетах дадут даже при высоте в 1—1,5 км осредненные, свободные от местных возмущений значения градиентов, так как обычные мелкие возмущения, имеющие характер ряби с расстоянием между максимумом и минимумом порядка 0,2—0,5 км, будут распространяться на высоту того же порядка и будут почти незаметны на высотах в 1—1,5 км.

В. Теоретическое определение величин X , Y и Z на различных высотах основано на уравнениях, связывающих значения X , Y и Z на различных высотах со значениями их на земной поверхности. Уравнения эти, выведенные Пасальским¹ в виде рядов, правая часть которых является независимой от производных по вертикали, имеют следующий вид:

$$X_z = X_0 + z \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{z^2}{1 \cdot 2} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial x \partial y} \right) - \frac{z^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{\partial^3 Z}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 Z}{\partial x \partial y^2} \right) + \frac{z^4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} \left(\frac{\partial^4 X}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 Y}{\partial x^3 \partial y} + \frac{\partial^4 X}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 Y}{\partial x \partial y^3} \right) + \dots \quad (1)$$

$$Y_z = Y_0 + z \frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{z^2}{1 \cdot 2} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} \right) - \frac{z^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{\partial^3 Z}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 Z}{\partial y^3} \right) + \frac{z^4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} \left(\frac{\partial^4 X}{\partial x^3 \partial y} + \frac{\partial^4 Y}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 X}{\partial x \partial y^3} + \frac{\partial^4 Y}{\partial y^4} \right) + \dots \quad (2)$$

$$Z_z = Z_0 - z \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} \right) - \frac{z^2}{1 \cdot 2} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right) + \frac{z^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{\partial^3 X}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 Y}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 X}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 Y}{\partial y^3} \right) + \frac{z^4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} \left(\frac{\partial^4 Z}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 Z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 Z}{\partial y^4} \right) + \dots \quad (3)$$

В этих уравнениях X_0 — значение северной составляющей на земной поверхности, X_z — значение ее на высоте z , Y_0 и Y_z — соответствующие значения восточной составляющей и Z_0 и Z_z — вертикальной составляющей. Замечу, что при выборе направления X лучше располагать его вдоль магнитного, а не истинного меридиана, так как такой выбор значительно упрощает все вычисления.

При изучении распределения элементов земного магнетизма над аномалиями удобнее всего брать одни аномальные составляющие, располагая ось X параллельно длинной оси аномалии (если она вытянута в одном направлении). Если в правых частях приведенных уравнений ограничиться лишь первыми производными, то для того, чтобы получать значения X_z , Y_z и Z_z , надо, кроме обычных карт с изолиниями X , Y и Z , построить дополнительно еще 5 карт для градиентов $\frac{\partial X}{\partial x}$, $\frac{\partial Y}{\partial y}$, $\frac{\partial Z}{\partial z}$, $\frac{\partial X}{\partial y}$ и $\frac{\partial Y}{\partial x}$.

$$\frac{\partial Z}{\partial y} \text{ и } \frac{\partial X}{\partial y} = \frac{\partial Y}{\partial x}.$$

Значения этих производных по обычным картам получаются простым путем подсчета числа изолиний на единицу длины для той точки и в том направлении, где мы желаем найти эти производные.

Аналогично этому по картам первых производных получаются и значения вторых. Однако большая часть карт магнитных аномалий не дает достаточно тщательно построенных изолиний вследствие того, что обычно в участках с максимальными градиентами X , Y и Z недостаточно точно определяются максимальные и минимальные значения X , Y и Z .

Для того чтобы получить близкие к истинным значения X , Y и Z вблизи этих максимумов, можно, вместо простой интерполяции между точками наблюдений, применить интерполяцию по величине и направлению вектора полной силы. Такой метод

¹ Пасальский. Об изучении распределения магнетизма на земной поверхности. Одесса, 1901 г.

иллюстрируется следующим примером. Определения аномальных составляющих производились на аномалии 1-го Северного рудника через 10 м и в трех последовательных точках дали следующие результаты:

Таблица 2

Расстояния	0 м	10 м	20 м
Y	0,75	0,89	0,36
Z	0,41	0,11	2,5

Значения даны в долях H_0 , равного 0,16 CGS.

По этим данным были построены векториальные диаграммы. При этом в промежутках между точками 0, 10 и 20 предполагаем линейное изменение как величины вектора полного напряжения, так и угла его наклона к горизонту, и вычисляем при таком допущении величины Y и Z для точек, расположенных через каждые 3 м. Для сравнения в табл. 3 приводятся значения Y и Z , определенные дополнительно в точках, на которых эти значения были получены предварительно путем интерполяции. В табл. 3 Y_1 и Z_1 — значения, вычисленные описанным выше путем; Y_2 и Z_2 — величины, определенные путем простой интерполяции; Y_3 и Z_3 — наблюдаемые значения. Кроме того, для лучшего сопоставления указанного метода с методом простой интерполяции приводятся значения Y_4 и Z_4 , полученные интерполяцией по величине и направлению между точками 0 и 20 (без принятия во внимание значения в точке 10), и Y_5 и Z_5 — такие же величины, полученные простой интерполяцией между этими точками.

Таблица 3

Точки	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Величина вектора	0,86	0,92	0,98	1,04	1,10	1,17	1,36	1,55	1,74	1,93	2,11
Наклон вектора	29	31	34	37	40	42	50	57	65	72	80
Y_1	0,75	0,79	0,81	0,82	0,85	0,89	0,86	0,84	0,74	0,58	0,36
Y_2	0,75	0,77	0,80	0,83	0,86	0,89	0,78	0,67	0,56	0,46	0,36
Y_3	0,75	0,76	0,78	0,78	0,78	0,89	0,87	0,87	0,84	0,72	0,36
Y_4	0,75	0,81	0,86	0,86	0,88	0,86	0,83	0,73	0,66	0,52	0,36
Y_5	0,75	0,71	0,67	0,63	0,60	0,56	0,52	0,48	0,44	0,40	0,36
Z_1	0,41	0,46	0,55	0,62	0,70	0,81	1,04	1,30	1,58	1,83	2,05
Z_2	0,41	0,48	0,57	0,65	0,73	0,81	1,06	1,31	1,56	1,81	2,05
Z_3	0,41	0,47	0,38	0,24	0,58	0,81	0,78	0,64	1,38	1,97	2,05
Z_4	0,41	0,54	0,70	0,84	1,02	1,20	1,38	1,56	1,74	1,91	2,05
Z_5	0,41	0,57	0,74	0,91	1,07	1,23	1,40	1,56	1,72	1,89	2,05

Все величины даны в долях H_0 , равного 0,16.

Сравнение наблюдаемых и интерполированных величин показывает, что указанный выше метод интерполяции дает несколько лучшие результаты в значениях Y , чем простая интерполяция, и максимальные значения очень близки к наблюдаемым в действительности. Все же интерполированные значения Z сильно отличаются от наблюдаемых.

Сравнение результатов интерполяции с действительно наблюдавшимися величинами осложняется в этом случае тем, что значения Y и Z претерпевают резкие изменения. Эти резкие изменения находились в связи с наличием над коренными породами отдельных крупных валунов магнетита, значительно искажающих магнитное поле, создаваемое всей залежью.

Все эти обстоятельства показывают, что, даже при применении описанного метода интерполяции и пересоставлении имеющихся магнитометрических карт, построение по ним карт градиентов недостаточно надежно, и использование уравнений (1), (2), (3) с производными выше первых затруднительно.

Практически оказывается достаточным ограничиться использованием зависимости между первыми производными, ¹ имеющей место в пространстве без свободных магнитных масс, а именно:

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{\partial Z}{\partial x}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial Z}{\partial y}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial z} = -\left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y}\right). \quad (6)$$

Пользуясь этими зависимостями между градиентами, легко, по данным магнитометрических карт, найти значения $\frac{\partial X}{\partial z}$, $\frac{\partial Y}{\partial z}$ и $\frac{\partial Z}{\partial z}$ и при помощи их получить распределение X , Y и Z на некоторой небольшой высоте z_1 . Величину z_1 выбираем так, чтобы градиенты по вертикали не претерпевали резких изменений в пределах этой высоты. Практически высота эта выбирается в зависимости от величин X , Y и Z так, чтобы произведения максимальных значений вертикальных градиентов $\frac{\partial X}{\partial z}$, $\frac{\partial Y}{\partial z}$ и $\frac{\partial Z}{\partial z}$ на эту высоту не превышали 10—20% от X , Y и Z .

По полученному на высоте z_1 распределению определяются значения горизонтальных градиентов $\frac{\partial X}{\partial x}$, $\frac{\partial Y}{\partial y}$, $\frac{\partial Z}{\partial x}$ и $\frac{\partial Z}{\partial y}$ на этой высоте. Найдя по ним при помощи формул (4), (5), (6) значения градиентов $\left(\frac{\partial X}{\partial z}\right)_1$, $\left(\frac{\partial Y}{\partial z}\right)_1$ и $\left(\frac{\partial Z}{\partial z}\right)_1$ по вертикали на высоте z_1 , переходим к следующей высоте z_2 и т. д.

При обычной точности магнитометрических съемок в участках, где градиенты не превышают 300—500 γ на 1 м, значения X , Y и Z , вычисленные для различных высот, получаются вполне надежными.

Для того чтобы использовать приведенный метод для вычисления изменений магнитных элементов на сравнительно небольших высотах (2—3 км) в „нормальном“ магнитном поле, достаточно брать градиенты X , Y и Z с имеющихся магнитных карт.

Как пример использования указанного метода в нормальном поле, мы помещаем ниже самые вычисления и результаты приведения к земной поверхности некоторых наблюдений Льюнгаля, ² сделанных им на цеппелине при арктическом полете 1929 г. на высоте 0,2—1,0 км над землей. Для приведения были по снятым с карт Фиска ³ значениям горизонтальной составляющей и наклона вычислены (для района полета цеппелина) значения вертикальной составляющей Z , сведенные в следующей таблице:

На основании данных табл. 5 вычислены значения градиентов $\frac{\partial Z}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial Z}{\partial y_1}$. За положительное направление X_1 принималось направление вдоль магнитного меридиана к северу, за положительное направление оси Y_1 — перпендикуляр к нему, напра-

¹ Б. П. Вейнберг. Достижения и перспективы метрологии в области геомагнитных определений. Журнал прикладной физики, 3, № 2, 207—224, 1926.

² Gustav S. Liungdahl Preliminary report of the magnetic observations made during aeroarctic expedition of gr. Zeppelin, Terr. Magn. Atm. El., Dec. 1931.

³ Fisk, Isomagnetic charts of the Arctic Sea, Nat. Res. Council, Washington, 1931.

Таблица 4

Значения Z

Долгота Широта	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
85°	554	546	552	540	549	536	544	535	524
80°	533	546	550	555	528	499	490	453	475
75°	510	527	551	541	529	545	568	564	575
70°	500	508	529	542	547	588	589	603	611
65°	492	514	537	567	569	582	615	613	630

вленный к востоку. Положительные Z направлены вниз. Значения градиентов даны в 0.0001 CGS на 100 км.

Таблица 5

Градиент $\frac{\partial Z}{\partial y_1}$

Долгота Широта	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
80°	+4	+2	0	0	+2	-1	-2	-3	-5
75°	+3	+4	+1	+1	-2	-8	-9	-14	-12
70°	+3	0	0	-1	-4	-3	-5	-5	-5

Градиент $\frac{\partial Z}{\partial x_1}$

Долгота Широта	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°
85°	-2	-6	-2	-4	-4	0	-23
80°	+9	+5	-10	-20	-20	-24	-34
75°	+14	+5	-8	+1	+14	+7	+2
70°	+8	+9	+5	+12	+11	+4	+6
65°	+9	+8	+6	+5	+9	-6	+3

После приведения наблюдений Льюнгаля к среднему годовому, я вычислил по этим таблицам значения градиентов $\frac{\partial Z}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial Z}{\partial y_1}$ в точках, где Льюнгадем были произведены магнитные определения. Так как на цепелине определялись значения горизонтальной составляющей и склонения, то градиенты X и Y , необходимые для вычисления поправок на наклонение, не вычислялись.

Для получения поправки склонения легко вывести из простых геометрических соображений следующую зависимость между градиентом склонения D и градиентами X_1 и Y_1 по вертикали:

$$\operatorname{tg} \frac{\partial D}{\partial z} = \frac{\partial Y_1}{\partial z} : X_1 + \frac{\partial X_1}{\partial z} \operatorname{tg} \frac{\partial D}{\partial z} : X_1. \quad (7)$$

Второй член правой части этого уравнения $\frac{\partial X_1}{\partial z} \operatorname{tg} \frac{\partial D}{\partial z} : X_1$ — величина второго порядка по сравнению с первым и ввиду этого без особой ошибки может быть отброшен.

Результаты приведений наблюдений Льюнгаля к земной поверхности показали, что даже в точках с наибольшими градиентами поправки не превышают 1—2 γ в горизонтальной составляющей и 0',5 в склонении, то-есть величин, которыми можно спокойно пренебречь, так как они значительно меньше как точности измерений, так и, особенно, точности приведения склонения и горизонтальной составляющей к годовому среднему. Так например, в точке с координатами $\varphi = 75^\circ 30'$, $\lambda = 104^\circ 24'$, в которой градиент $\frac{\partial X_1}{\partial z}$ достигает одной из наибольших величин, — 0,9 γ на 1 км, при высоте наблюдения в 1150 м получается поправка для приведения H к земной поверхности, равная $-0,9 \cdot 1,15 = -1 \gamma$. В точке с $\varphi = 81^\circ 12'$ и $\lambda = 87^\circ 00'$ градиент $\frac{\partial y_1}{\partial z}$ равен 1,1 γ на 1 км. Высота цеппелина 0,5 км; $X = H = 0,0411$. Из этих данных поправка в склонении D получается равной:

$$\Delta D = \arctg \frac{-0,000011 \cdot 0,5}{0,0411} = -0',4.$$

Мы остановились подробно на приведении магнитных определений, сделанных на самолете, к уровню земли с тем, чтобы показать очень малую разницу в нормальных значениях элементов земного магнетизма на земле и на высоте в 1—2 км. Если же мы будем делать определения на различных высотах над одной и той же точкой земной поверхности, то мы безусловно получим значительно большие градиенты, чем получилось бы по теоретическому расчету по сглаженным значениям X , Y и Z . Это обуславливается тем, что вследствие наличия магнитной ряби мы почти никогда не сможем попасть на такую точку, в которой не только абсолютные значения элементов земного магнетизма отвечали бы „нормальным“, то-есть средним для целого района, но и градиенты их были бы равны градиентам нормального поля, так как средние расстояния между максимумами магнитной ряби не превышают 0,5—1,0 км, а изменения „нормального“ поля, за исключением некоторых участков около полюсов, становятся заметными лишь на расстоянии в 5—10 км и достигают величин, соизмеримых с величиною магнитной ряби, лишь на 10—20 км.

Совершенно другой характер имеют изменения над аномалиями. Мы будем разбирать характер изменений только над сильными магнитными аномалиями, так как изменения магнитного поля над слабыми аномалиями пока не вычислялись и при современном состоянии наших знаний о причинах (геологических) и характере слабых аномалий не представляют большого интереса.

В большинстве случаев, сильные магнитные аномалии быстро убывают с высотой, и изменения эти в районе Курских аномалий настолько резки, что делают невозможным использование компаса при полетах над ними, так как, даже если построить самые детальные карты склонения в этом районе, мы не можем достаточно точно знать координаты и высоту аэроплана, чтобы использовать эти карты.¹

Результаты подобных вычислений и построений можно представлять различным образом. Способами представления результатов могут быть:

1. Таблицы значений элементов земного магнетизма на различных высотах.
2. Карты распределения элементов земного магнетизма на различных высотах.
3. Кривые изменения X , Y , Z , D , H и I на различных высотах в некоторых характерных сечениях.

Такие кривые были построены, например, мною при анализе распределения склонения над Курской аномалией и приводятся ниже на рис. 1 и 2, на котором изображены значения D , Y и Z в зависимости от высоты.

4. Изображения аномальных сил стрелками, расположенными на различных высотах над аномалией в характерных ее сечениях. Этот метод изображения

¹ К. Б. Вейнберг. О возможности использования магнитного компаса для аэронавигации при полетах над сильными магнитными аномалиями, Журнал геофизики, № 1, 1934.

применял Б. П. Вейнберг при определении аномальных сил над одной из аномалий, снятых Лепешинским. Результаты таких вычислений для одного из характерных разрезов приводятся на рис. 3. Масштаб рисунка 1:4000. Стрелки изображены в масштабе H_0 в 0,5 см.

5. Изображение магнитного поля Фарадеевскими силовыми линиями в различных характеризующих аномалию участках.

Для того чтобы пояснить последний способ, предлагаемый мною и являющийся, повидимому, во многих случаях наиболее практически удобным для сопоставления результатов магнитометрической съемки с геологическим строением месторождения, разберем в качестве примера реальный случай — 1-й Северный рудник на Северном Урале. Данные магнитометрической съемки берем с карты Баженова 1929 г. и сопоставляем их с результатами проведенных мною в 1931 и 1932 г. геологических разведок. Для того

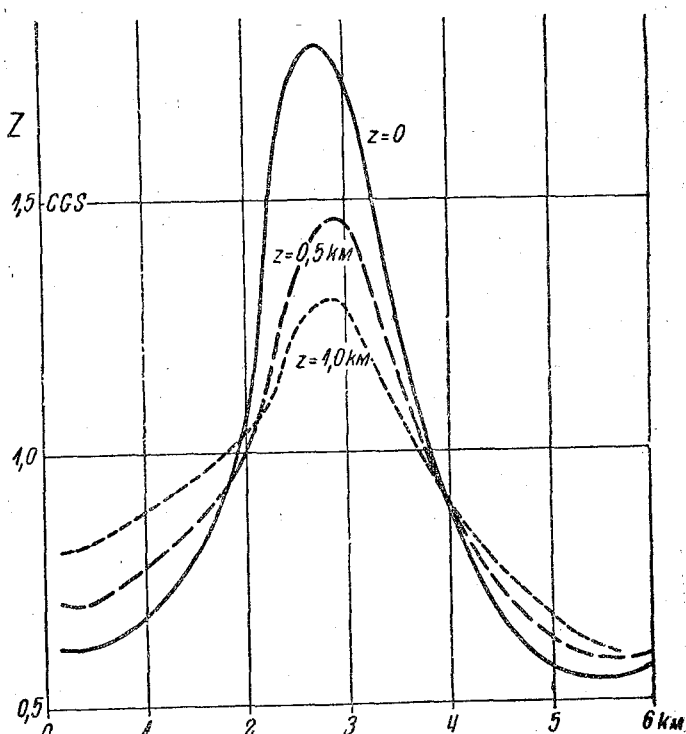


Рис. 1.

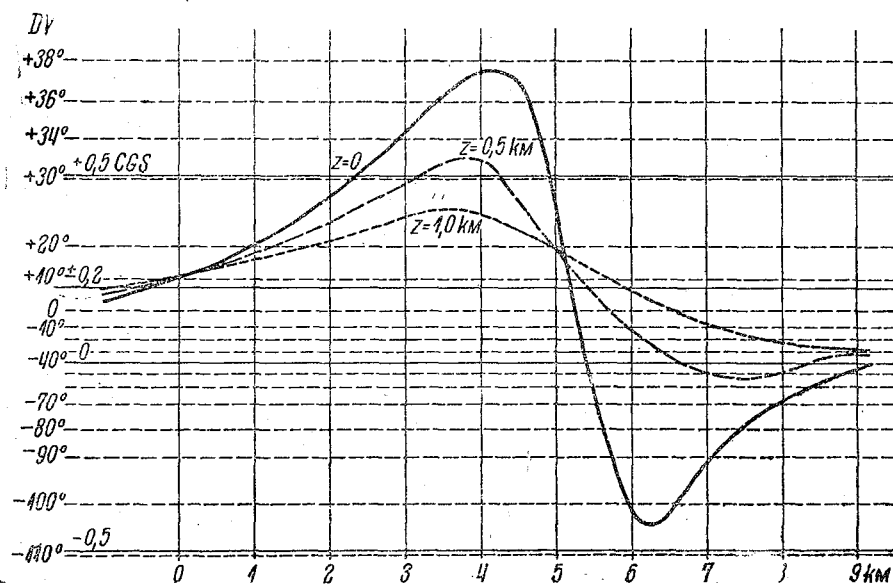


Рис. 2.

чтобы сделать более понятным сопоставление результатов магнитометрической съемки с геологическим строением, приведу краткое описание района 1-го Северного рудника.

Район сложен толщей средне-девонских осадочных пород, представленных известняками, покрытыми свитой туфо-сланцев; последние представляют собою породы, получившиеся в результате перемыва материала основных вулканических туфов. Вся эта толща прорезана рядом мощных интрузий тел диабазов. Во время внедрения (интрузии) диабазы в некоторых местах захватили обломки известняков и образовали зону брекчиевидных известковистых диабазов, расположенных к западу от Главного рудного поля (рис. 4).

Диабазовая магма района 1-го Северного рудника была обогащена минерализующими растворами и газами, которые при медленном остывании массива привели, с одной стороны, к замещению известняков магнетитом и, с другой стороны, —

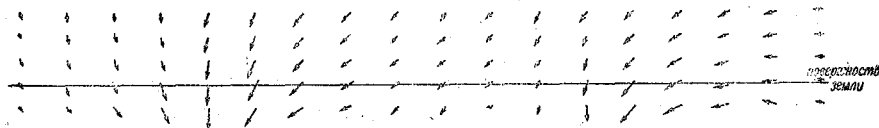


Рис. 3.

к выделению кислых диабазовых пегматитов. Остывание сопровождалось выделением значительного количества горячей воды, которая в остывших уже частях массива привела к образованию хлористо-амфиболовых и местами пренитовых скарнов.

В районе находятся три группы выходов магнетита: Главное рудное поле, Восточная аномалия и выходы на р. Казанке. Как видно из предыдущего описания, все эти выходы образовались в результате замещения известняков, расположенных в контакте с диабазами. На Главном рудном поле магнетитом оказались замещенными не только известняк, образующий выступ в лежащем боку диабазов, длиною около 600 м, но и частично глыбы и обломки его среди известковистых диабазов.

Выступ известняков оказался замещенным сверху и с боков, и на глубине мощность залежи магнетита убывает. После того как рудное тело образовалось, покрывающие его породы и верхняя часть рудной залежи были смыты, и в настоящее время мы наблюдаем два рудных тела, круто падающих к востоку и разделенных выходом известняков. Размытая часть рудного тела оказалась отложенной вблизи рудного тела (к западу, югу и юго-востоку) в виде покрывающего коренные породы слоя глины с валунами магнетита мощностью от 0,5 до 3,0 м. С этими валунчатыми рудами связан ряд мелких небольших аномалий в стороне от рудного тела.

По магнитности вмещающие рудное тело породы разделяются на: 1) немагнитные — известняки, туфо-сланцы, диабазовые пегматиты (закрывающие очень небольшую примесь титано-магнетита) и известковистые диабазы; 2) слабо магнитные диабазы с равномерным (сравнительно) содержанием магнетита; 3) более сильно намагниченные амфиболовые и хлористые скарны с очень непостоянным и неравномерным содержанием магнетита и иногда туфы, появляющиеся в виде прослоев туфо-сланцев. Благодаря тому, что кристаллизация магнетита во всех описанных породах (кроме туфов) происходила одновременно с образованием вмещающих пород и что механических перемещений магнетита после его образования не было, все породы, слагающие район, должны обладать полярностью. Это обстоятельство указывает на то, что благодаря слабой магнитности большей части этих пород, при расчетах величин магнитных элементов на глубине, вмещающие породы, кроме частично скарнов, существенных искажений в магнитные силы, подсчитанные теоретически на основе данных о распределении их на поверхности, не внесут.

Для сопоставления магнитометрических и разведочных данных я выбрал разрез по 6-му поперечнику общей магнитометрической съемки Баженова. Так как рудные тела, как и аномалия, их сопровождающая, вытянуты в одном направлении, то для вычисления аномальных составляющих на глубине (и высоте) можно упростить уравнения (4), (5) (6), располагая ось Y -ов параллельно стрелкам аномальных сил и ось

X -ов перпендикулярно к ним. Тогда составляющая X и градиенты $\frac{\partial X}{\partial y}$, $\frac{\partial Y}{\partial y}$ и $\frac{\partial Z}{\partial y}$ будут величинами, которыми можно практически пренебречь.

Для того чтобы получить распределение аномальных составляющих на различных высотах, вычерчиваем на одном куске миллиметровки (для удобства производства графических расчетов) распределение Y в зависимости от y и Z в зависимости от y (рис. 5). При этом, так как обычно число точек наблюдений недостаточно, следим при вычерчивании, чтобы по возможности все максимальные значения Y соответствовали максимальным градиентам $\frac{\partial Z}{\partial y}$ и наоборот.

Величины градиентов получаем, прикладывая линейку касательно к проведенным кривым в точках с максимальными, минимальными и некоторыми промежуточными значениями градиентов и определяя тангенс угла наклона линейки. Промежуточные точки выбираем так, чтобы все резкие изменения наклона кривых отражались на снятых градиентах. В участке со значительными по величине градиентами определяем величину Z_1 , которая в нашем случае оказалась равной 1,0 м. На этой же диаграмме строим последовательные распределения Y и Z для различных высот (и глубин), причем в участках восточнее залежи, где градиенты и значения Y и Z малы, удобно воспользоваться диаграммами большего масштаба. Там, где величины Y и Z начинают изменяться очень быстро (более 20% на 1 м), экстраполяцию на глубину прекращаем, так как, вероятно, здесь мы уже входим в рудное тело, и уравнения (4), (5), (6) становятся недействительными.

Для наиболее наглядного сопоставления мы изобразили результаты произведенных вычислений в виде силовых линий.

Этот метод, применявшийся Фарадеем, является как бы естественным дополнением метода стрелок, так как при последнем построение стрелок все равно необходимо. Силовые линии мы проводим касательно к стрелкам, расстояния же между силовыми линиями берем обратно пропорциональными величинам стрелок. Иногда — в тех частях, где элементы земного магнетизма изменяются настолько резко, что неточное знание градиентов не дает возможности получения надежных значений X , Y и Z на высоте, — мы можем использовать этот метод для того, чтобы получить магнитное поле на различных высотах. Для этого мы строим продольный и поперечный разрезы участка, на котором мы желаем определить значения магнитных элементов на высоте, строим стрелки на одной высоте и проводим силовые линии на расстояниях, обратно пропорциональных величине этих стрелок. Направления силовых линий изменяем постепенно от одной точки к другой и на краях участка соединяем с силовыми линиями, проведенными на основании вычислений в более слабом поле. По проведенным таким способом силовым линиям мы можем приблизительно определить X , Y и Z на следующей высоте, затем на следующей и т. д.

Для того чтобы сопоставить силовые линии, проведенные указанными выше способами, с формой рудных тел, мы должны провести нормально к ним эквипотенциальные поверхности, одна из которых при отсутствии скарновой зоны будет близка к границам рудного тела (какое именно, можно определить бурением в каком-нибудь одном месте). Эти эквипотенциальные поверхности должны вблизи полюсов обхватывать рудное тело и между ними входить в него. В приводимом примере 1-го Северного рудника такая поверхность оказалась довольно близкою к выявленной верхней границе рудного тела. Наибольшие отклонения, наблюдающиеся близ поверхности, объясняются искажениями, которых вносятся развитием валунчатых руд и скарнов.

Приведенным выше методом можно произвести определения X , Y и Z на ограниченной высоте, пределы которой определяются масштабом аномалии, ошибками наблюдений, неточностями, которые получаются при пользовании упрощенными формулами, неточностью проведения сечений параллельно силовым линиям на поверхности, разными случайными влияниями (например валунами магнетита, искажающими поле, создаваемое залежью магнетита), ошибками вычислений и накапливающимися при суммировании этих ошибок систематическими погрешностями, увеличивающимися с высотой. Такой предел экстраполяции на высоту в приводимом примере 1-го Северного рудника — 50 м, в приведенном ранее примере Курской аномалии — 1,5 км. Для определения магнитных элементов на значительной высоте лучше всего, сравнивая

распределение X , Y и Z с распределением их над каким-либо из тел правильной формы (во многих случаях определяющей по данным разведок), определить приблизительно форму и размер этого тела. При этом способе можно по теоретически известной зависимости между X , Y и Z вычислить их в любой точке над рудным телом, рассматривая их как производные потенциала.¹

Произведенное выше сопоставление результатов магнитометрической съемки 1-го Северного рудника с его геологическим строением показывает, что весьма ценным для разведчика материалом явилось бы добавление к обычным магнитометрическим картам нескольких характерных разрезов, изображающих распределения силовых линий вдоль и поперек аномалии. Для того чтобы построить такие разрезы, в большинстве случаев будет необходимо при производстве съемки пройти по линиям, по которым мы желаем построить такие разрезы, с детальными и особенно тщательными определениями магнитных элементов, что даст возможность безошибочного определения направления падения рудных тел.

THE APPLICATION OF THE FARADAY'S METHOD OF REPRESENTATION OF THE MAGNETIC FIELD BY THE LINES OF FORCE TO THE INTERPRETATION OF THE MAGNETIC SURVEYS

By *K. B. Weinberg*

Summary

The distribution of the magnetic elements over a certain area can be considered as known when we know not only their values on the earth's surface, but when we can also estimate these values practically in any point above or below the surface.

The estimation of these values can be made 1) by means of observations and 2) theoretically.

For the first method can be used the observations on high tripods, on special towers and on airplanes above the surface and in pits, mines and shafts under it.

The determinations of the magnetic elements above or below the surface give only (if we compare them with the values of the magnetic elements on the earth's surface) the rate of changes of the magnetic elements with height at certain points. The distribution of the magnetic elements in all the space below or above the earth's surface usually can not be obtained on account of the high cost of investigation.

The comparison of the determinations performed below the earth's surface with their values on it can rarely give the rate of their vertical change above, because, usually, the magnetic masses are present in the layers in which the pits and shafts (in which the determinations are made) are done. This statement is illustrated by an example (table I) of the determinations of anomalous force in one of the pits in the First Northern Mine of the magnetite in the Northern Ural, where, in this pit, the layers of magnetite in clay are found from the surface to the depth of 3 m and the values of the anomalous force below them are due to their presence.

The second — theoretical — method is based on the equations (1), (2), (3) giving the values of X , Y and Z on a height z as functions of their distribution on the earth's surface (see russian text p. 4).

If in the right part of these equations we reject even the second derivatives — $\frac{\partial^2(f)}{\partial^2}$ —, then, in order to compute the values of X , Y and Z on height, we must construct additionally to the ordinary magnetic maps five charts, showing the distribution of the gradients

$$\frac{\partial Z}{\partial x}, \frac{\partial Z}{\partial y}, \frac{\partial X}{\partial x}, \frac{\partial Y}{\partial y} \text{ and } \frac{\partial X}{\partial y} = \frac{\partial Y}{\partial x}.$$

¹ Н. Малкин, Зависимость между потенциалом и его градиентами на сферической поверхности в применении к теории земного магнетизма. Известия Академии наук СССР, Отделение физико-математических наук, 1930.

The magnetic maps of the anomalies are usually not enough detailed for the construction of such charts and particularly the maximal values of Y and X are absent. In order to obtain these maximal values the author recommends the interpolation of values of the total anomalous intensity and of the direction of this vector. Such a procedure gives better results than simple interpolation.

The application of the formulae (1), (2), (3) with the second derivatives being usually useless, the equations (1), (2), (3) may be replaced by equations (4), (5), (6).

In this case the calculation of X_z , Y_z and Z_z on the height z can be performed by adding to the values of X_0 , Y_0 and Z_0 on the surface the values of $\frac{\partial X}{\partial z}z$, $\frac{\partial Y}{\partial z}z$ and $\frac{\partial Z}{\partial z}z$ where z must be determined so that the values of $\frac{X_z}{X_0}$, $\frac{Y_z}{Y_0}$ and $\frac{Z_z}{Z_0}$ in the points with the maximal values of X_0 , Y_0 and Z_0 should not exceed 20%. Having found in this way the values of X_z , Y_z and Z_z at the height z_1 and constructed a magnetic chart for this level we can ascend by the same method to the next level z_2 and so on.

This method was used by the author for calculating the height-corrections to the determinations made by Ljungdahl on the zeppelin „LZ 127“ in 1929.

The calculation of this correction shows that it does not exceed the determination-errors, being in the points with the maximal gradient equal to $\pm 0',5$ in declination and $\pm 2\gamma$ in horizontal intensity.

Over the anomalous regions the variations are greater.

In order to determine the distribution of the magnetic elements in the anomalous regions the cited method can be applied. In the cases, when the field of the anomaly is oblong this method can be simplified by calculating the values of the magnetic elements in the cross-sections normal to the axis of the anomaly. In this case the values of $X \frac{\partial X}{\partial y}$, $\frac{\partial Y}{\partial y}$ and $\frac{\partial Z}{\partial y}$ can be supposed to be equal to zero.

In order to represent the results of such calculations can be used the following five methods:

1. Tables of values of magnetic elements at different heights.
2. Charts of distribution of the same, drawn for different heights.
3. Curves, giving the values of X , Y , Z , D , H and I as functions of x or y on different heights in the characteristic cross-sections of the anomaly. (This method is illustrated by figs. 1, 2, showing the distribution of D , Y and Z over the anomaly of Kursk).
4. Arrows of force distributed at different heights over the anomaly in the same cross-sections or a tridimensional model. This method is illustrated by fig. 3.
5. Application of Faraday's method by drawing the lines of force in the mentioned cross-sections at distances inversely proportional to the total anomalous intensity or by constructing a tridimensional model of the anomaly.

The method 5) is illustrated by the example from the First Northern Mine (fig. 4).

The lines of force are drawn in the cross-section normal to the length of the anomaly, and may be compared with the shape and depth of the ore (magnetite) body represented on the same figure. The equipotential line, drawn normally to these force lines, is very close to the margins of the ore body.

The layers, inclosing the magnetite, are: 1) non-magnetic Middle-Devonian limestones and schists; 2) slightly polarly magnetized diabases; 3) uniformly polarly magnetized amphibolites.

Of all these only the last can alter the magnetic field of the magnetite body.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО СБРОСА

Под прямой магнитометрической задачей предполагается исследование магнитного (аномального) поля на поверхности земли, создаваемого залежью магнитных масс.

Обратная магнитометрическая задача ставит целью определение размеров залегающего хребта по измеренным величинам тех или других компонентов магнитного поля.

1. ПРЯМАЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА

§ 1. Постановка задачи

Представим себе бесконечно простирающийся хребет ферро-магнитных масс в форме прямого сброса с неограниченным контуром поперечного сечения в виде двух прямоугольных полуполос одинаковой толщины.

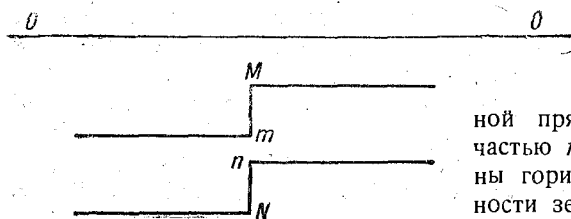


Рис. 1.

Две из боковых сторон указанных полуполос лежат на одной прямой MN с произвольной общей частью mn . Полупрямые контура параллельны горизонтальной прямой 00 на поверхности земли.

При решении задачи исходим из следующих предположений:

1. Тело хребта считаем изотропным и однородным с постоянной магнитной восприимчивостью.

2. Хребет находится в однородном магнитном поле земли, потенциал которого w ; при этом направление поля располагается в нормальном сечении хребта.

В таком случае задача изучения магнитного поля прямого сброса превращается в плоскую задачу.

При решении настоящей задачи мы исходим из основных уравнений Пуассона—Грина, относящихся к теории магнитной индукции:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x_i} + \frac{\partial v}{\partial x_i} + \frac{4\pi}{3g} A_i (1 - g) = 0 \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$\Psi = \int_{(s)} \frac{\partial \varphi}{\partial n} - \frac{\partial s}{r} \quad (1)$$

Не останавливаясь на этой теории и решении системы (1), что можно найти в работах [1—3] по этим вопросам, отметим только результаты.

Модифицируя эту систему (2) на случай плоской задачи с предварительной интеграцией первых трех уравнений, получим для нашей задачи систему:

$$\left. \begin{aligned} (1 - g') \Phi + \frac{g'}{2\pi} (\Psi + w) &= 0; \\ \Psi &= 2 \int_{(L)} \frac{\partial \Phi}{\partial n} \ln \frac{1}{r} dl. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Последняя система сводится к одному интегральному уравнению (4):

$$\Psi = -\frac{g'}{\pi} \int_{(L)} \frac{\partial \Psi}{\partial n} \ln \frac{1}{r} dl + F;$$

где

$$F = -\frac{g'}{\pi} \int_{(L)} \frac{\partial \omega}{\partial n} \ln \frac{1}{r} dl.$$

Ψ — индуцированный потенциал магнитного поля; ω — потенциал магнитного поля земли; g' — величина, соответствующая величине g в системе (1); g — магнитная характеристика вещества тела, удовлетворяющая неравенству $0 < g \leq 1$; n — внешняя нормаль; r — расстояние между точкой интегрирования и притягиваемой точкой (Aufpunkt); dl — элемент контура L .

Методом последовательных приближений находим:

$$\begin{aligned} \Psi_0 &= F; \\ \Psi_k &= -\frac{g'}{\pi} \int_{(L)} \frac{\partial \Psi_{k-1}}{\partial n} \ln \frac{1}{r} dl \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \end{aligned}$$

где $\Psi_0 = F$ есть первое приближение.

Как и во многих других задачах подобного рода, мы займемся изучением первого приближения, что соответствует случаю однородного намагничивания.

§ 2. Потенциал

Итак, имеем:

$$\Psi = F = -\frac{g'}{\pi} \int \frac{\partial \omega}{\partial n} \ln \frac{1}{r} dl. \quad (2')$$

Выясним предварительно значение F для сечения с ограниченным контуром в виде двух равных прямоугольников с горизонтальной стороной a .

Для решения задачи мы применяем переносную систему координат, которая позволит весьма удобно представить в аналитической форме искомые величины и облегчит возможность их исследования. Начала координат помещаем в вершинах контура, расположенных на общей стороне сброса: плоскость XOY лежит в плоскости контура, а ось OZ перпендикулярно на последней.

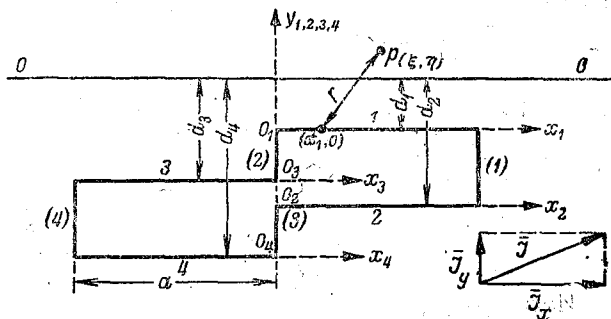


Рис. 2.

Условимся о применяемых

в дальнейшем обозначениях и индексах: $i, (i)$ указывает соответственно номер горизонтальной и боковой сторон; x_1, y_1 — абсцисса и ордината интегрирования по контуру L в i -й системе координат; ξ_i, η_i — координаты одного и того же аупункта $P(\xi, \eta)$, отнесенные к i -й системе координат; d_i — глубина залегания i -й стороны под поверхностью земли.

Берем произвольный по направлению, но расположенный в плоскости контура L , вектор $\vec{I}$ намагничивания. Разбиваем поле вектора $\vec{I}$ на два поля — поле вектора $\vec{I}_x$, параллельного горизонтальной стороне контура, и поле вектора $\vec{I}_y$, параллельного вертикальной стороне.

Потенциал ω однородного поля земли выражается, как известно, так:

$$\omega = -I_x x - I_y y. \quad (3)$$

Потенциал поля I_y . Для определения в точке $P_{(\xi, \eta)}$ потенциала, согласно формуле (2), совершаем интегрирование (обход по часовой стрелке) по контуру L , вычисляя предварительно $\frac{\partial w}{\partial n}$ на каждой из сторон контура (n — нормаль внешняя). Согласно формуле (3) имеем:

$$\left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)_{(1), (2), (3), (4)} = 0; \quad (*)$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)_{1, 3} = -I_y, \quad \left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)_{2, 4} = -I_x.$$

Обозначим потенциалы, создаваемые каждой из сторон контура, соответственно через $F_{i, y}$ и $F_{(i), y}$. Тогда полный потенциал запишется так:

$$\sum_{i=1}^{i=4} F_{i, y} + \sum_{i=1}^{i=4} F_{(i), y}.$$

В силу (*)

$$\sum_{i=1}^{i=4} F_{i, y} = 0.$$

Остается

$$\sum_{i=1}^{i=4} F_{i, y}$$

где

$$\left. \begin{aligned} F_{i, y} &= (-1)^i A \int_0^a \ln V(x_1 - \xi_i)^2 + \eta_i^2 dx & (i=1, 2) \\ F_{i, y} &= (-1)^i A \int_0^a \ln V(x_1 + \xi_i)^2 + \eta_i^2 dx & (i=3, 4) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

причем

$$A = \frac{g' I_y}{\pi}.$$

В нашей системе координат $x_i = x_1$ и $\xi_i = \xi_1$.

Потенциал поля I_x .

$$\left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)_{1, 2, 3, 4} = 0;$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)_{(1), (3)} = -I_x, \quad \left(\frac{\partial w}{\partial n} \right)_{(2), (4)} = I_x.$$

Имеем потенциал

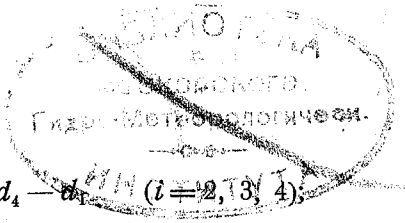
$$\sum_{i=1}^{i=4} F_{(i), x},$$

где

$$\left. \begin{aligned} F_{(i), x} &= B \int_{-k_i}^{(-1)^i h - k_i} \ln V[a + (-1)^i \xi_1]^2 + (y_1 - \eta_i)^2 dy_1 & (i=1, 4) \\ F_{(i), x} &= B \int_{-k_i}^{(-1)^i h - k_i} \ln V\xi_1^2 + (y_1 - \eta_i)^2 dy_1 & (i=2, 3) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

причем

$$B = \frac{g' I_x}{\pi}.$$



Для получения формул (5) следует иметь в виду, что

$$y_i = y_1 + k_i; \quad \eta_i = \eta_1 + k_i; \quad dy_i = dy_1;$$

$$k_1 = 0; \quad k_2 = d_2 - d_1; \quad k_3 = d_3 - d_1; \quad k_4 = d_4 - d_1 \quad (i=2, 3, 4);$$

$h = d_2 - d_1$ высота прямоугольника.

Потенциал поля I . Складывая потенциалы полей $\bar{I}_y$ и $\bar{I}_x$, будем иметь

$$F = \sum_{i=1}^{i=4} F_{i,y} + \sum_{i=1}^{i=4} F_{(i),x}.$$

Предельный переход к неограниченному контуру

Потенциал поля $\bar{I}_y$. Предельный переход к потенциалу

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{i=4} F_{i,y} \quad \text{при } a \rightarrow \infty$$

нами подробно рассмотрен в нашей работе „Магнитное поле косого сброса“. Здесь пришлось бы повторить с некоторыми упрощениями те же рассуждения. Ссылаясь на эту работу, приведем здесь окончательный результат:

$$F_y = \lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{i=4} F_{i,y} = \frac{1}{2} A \sum_{i=1}^{i=2} (-1)^i \left[\xi \ln (\xi^2 + \eta_i^2) + 2\eta_i \left(\arctg \frac{\xi_1}{\eta_i} + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \\ + \frac{1}{2} A \sum_{i=3}^{i=4} (-1)^{i+1} \left[\xi \ln (\xi_1^2 + \eta_i^2) + 2\eta_i \left(\arctg \frac{\xi_1}{\eta_i} - \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (6)$$

Потенциал поля $\bar{I}_x$.

$$F_x = \lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1,4} F_{(i),x} + \sum_{i=2,3} F_{(i),x}.$$

Вторая сумма от a не зависит и есть величина конечная. Можно показать, что

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1,4} F_{(i),x} \rightarrow 0.$$

Тогда

$$F_x = \sum_{i=2,3} F_{(i),x} = \frac{1}{2} B \sum_{i=2,3} \int_{-k_i}^{(-1)^i h - k_i} \ln [\xi_1^2 + (y_1 - \eta_i)^2] dy_1. \quad (7)$$

Потенциал поля I . В соответствии с формулами (6) и (7) потенциал поля запишется

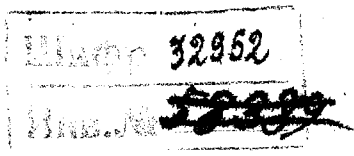
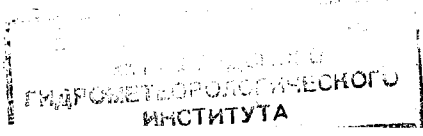
$$\lim_{a \rightarrow \infty} F = \lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{i=4} F_{i,y} + \sum_{i=2,3} F_{(i),x}. \quad (8)$$

§ 3. Градиенты

В дальнейшем предполагается неограниченный контур сечения.

Градиенты поля $\bar{I}_y$. Обозначим горизонтальный и вертикальный градиенты через H_y и Z_y . Имея в виду, что

$$H_y = -\frac{\partial F_y}{\partial \xi_1} = -\lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial F_{i,y}}{\partial \xi_1} \quad \text{и} \quad Z_y = -\frac{\partial F_y}{\partial \eta_1} = -\lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial F_{i,y}}{\partial \eta_1}$$



и дифференцируя правую часть формулы (6) сперва по ξ_1 , затем по η_1 , получим

$$H_y = \frac{1}{2} A \ln \frac{(\xi_1^2 + \eta_1^2)(\xi_1^2 + \eta_4^2)}{(\xi_1^2 + \eta_2^2)(\xi_1^2 + \eta_3^2)} \quad (9)$$

$$Z_y = A \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\xi_1}{\eta_1} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\xi_1}{\eta_2} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\xi_1}{\eta_3} + \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\xi_1}{\eta_4} \right]. \quad (10)$$

Градиенты поля $\bar{I}_x$. Имея в виду, что

$$H_x = -\frac{\partial F_x}{\partial \xi_1} \quad \text{и} \quad Z_x = -\frac{\partial F_x}{\partial \eta_1}$$

и дифференцируя правую часть формулы (7) сперва по ξ_1 , а затем по η_1 , получим

$$H_x = B \sum_{i=2,3} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y_1 - \eta_i}{\xi_1} \left| \begin{matrix} (-1)^i h - k_i \\ -k_i \end{matrix} \right. \quad (11)$$

$$Z_x = \frac{1}{2} B \sum_{i=2,3} \ln [\xi_1^2 + (y_1 - \eta_i)^2] \left| \begin{matrix} (-1)^i h - k_i \\ -k_i \end{matrix} \right. \quad (12)$$

Градиент поля $\bar{I}$. В соответствии с формулами (8), (9), (10), (12) градиенты поля I запишутся:

$$H = -\lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial F_{i,y}}{\partial \xi_1} - \sum_{i=2,3} \frac{\partial F_{(i),x}}{\partial \xi_i} = H_y + H_x,$$

$$Z = -\lim_{a \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial F_{i,y}}{\partial \eta_i} - \sum_{i=2,3} \frac{\partial F_{(i),x}}{\partial \eta_i} = Z_y + Z_x.$$

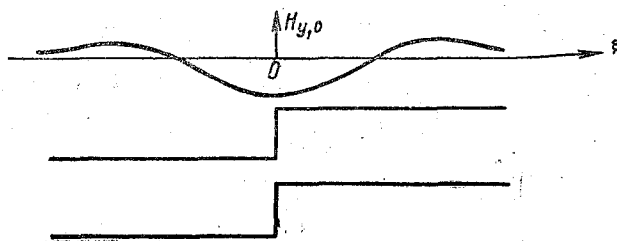


Рис. 3.

Распределение градиентов вдоль прямой OO . Обозначим значения градиентов H_y , Z_y , H_x и Z_x на поверхности земли вдоль прямой OO соответственно через $H_{y,0}$, $Z_{y,0}$, $H_{x,0}$ и $Z_{x,0}$.

Поле $\bar{I}_y$. Характеристика $H_{y,0}$. Имеем

$$H_{y,0} = \frac{1}{2} A \ln \frac{(\xi_1^2 + d_1^2)(\xi_1^2 + d_4^2)}{(\xi_1^2 + d_2^2)(\xi_1^2 + d_3^2)}. \quad (9')$$

Отбрасываем при ξ_1 индекс, как не имеющий значения.

Найдем нулевые точки $H_{y,0}$ (точки пересечения кривой (рис. 3) с осью OO).

Из условия $H_{y, o} = 0$ получаем квадратное уравнение

$$\xi^2 [(d_4^2 - d_3^2) - (d_2^2 - d_1^2)] + d_4^2 d_1^2 - d_3^2 d_2^2 = 0,$$

откуда

$$\xi = \pm \sqrt{\frac{d_3^2 d_2^2 - d_4^2 d_1^2}{(d_4^2 - d_3^2) - (d_2^2 - d_1^2)}}. \quad (13)$$

Таким образом, $H_{y, o}$ имеет две нулевых точки. Легко показать, что числитель и знаменатель подкоренного выражения положительны.

Найдем extrema $H_{y, o}$;

$$\frac{dH_{y, o}}{d\xi} = A \left[\frac{\xi}{\xi^2 + d_1^2} - \frac{\xi}{\xi^2 + d_2^2} - \frac{\xi}{\xi^2 + d_3^2} + \frac{\xi}{\xi^2 + d_4^2} \right] = 0, \quad (14)$$

откуда $\xi = 0$. Испытывая знак:

$$\left. \frac{d^2 H}{d\xi^2} \right|_{\xi=0} = \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4},$$

убеждаемся, что

$$\left. \frac{d^2 H}{d\xi^2} \right|_{\xi=0} > 0,$$

и следовательно $H_{y, o}$ в точке $\xi = 0$ имеет minimum:

$$\min H_{y, o} |_{\xi=0} = A \ln \frac{d_1 d_4}{d_2 d_3} < 0,$$

так как $d_1 d_4 < d_2 d_3$.

Из (14) находим также, что

$$a\xi^4 - 2b\xi^2 - c = 0, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} a &= (d_4^2 - d_3^2) - (d_2^2 - d_1^2); \\ b &= d_2^2 d_3^2 - d_1^2 d_4^2; \\ c &= d_2^2 d_3^2 (d_1^2 + d_4^2) - d_1^2 d_4^2 (d_2^2 + d_3^2), \end{aligned}$$

причем можно показать, что $a > 0$, $b > 0$, $c > 0$.

Таким образом уравнение (15) имеет два вещественных (равных по абсолютному значению) и два мнимых корня.

Так как $H_{y, o} \rightarrow 0$ при $\xi \rightarrow \pm \infty$, то можно утверждать, что при вещественных корнях уравнение (15) $H_{y, o}$ имеет два равных и положительных maximum'a, симметричных относительно вертикальной координатной оси.

Характеристика $Z_{y, o}$. Имеем

$$Z_{y, o} = A \left[\arctg \frac{\xi}{d_1} - \arctg \frac{\xi}{d_2} - \arctg \frac{\xi}{d_3} + \arctg \frac{\xi}{d_4} \right].$$

Найдем нулевые точки. Из условия $Z_{y, o} = 0$, имеем:

$$\xi (d_3 d_4 - d_1 d_2) = 0,$$

откуда $\xi = 0$.

Таким образом $Z_{y, o}$ имеет одну нулевую точку в начале координат (рис. 4).

Найдем extrema $Z_{y, o}$. Из условия имеем уравнение:

$$\frac{dZ_{y, o}}{d\xi} = A \left[\frac{d_1}{\xi^2 + d_1^2} - \frac{d_2}{\xi^2 + d_2^2} - \frac{d_3}{\xi^2 + d_3^2} + \frac{d_4}{\xi^2 + d_4^2} \right] = 0, \quad (16)$$

где

$$a_1 \xi^4 - b_1 \xi^2 - c_1 = 0;$$

$$a_1 = (d_3^2 + d_4^2 + d_3 d_4) - (d_1^2 + d_2^2 + d_1 d_2);$$

$$b_1 = (d_3^2 + d_4^2 + d_1 d_2) d_1 d_2 - (d_1^2 + d_2^2 + d_3 d_4) d_3 d_4;$$

$$c_1 = d_1 d_2 d_3 d_4 (d_3 d_4 - d_1 d_2),$$

причем $a_1 > 0$ и $c_1 > 0$.

Таким образом уравнение имеет два вещественных корня, при которых $Z_{y, o}$ имеет экстрема при положительном корне maximum, так как $\left. \frac{dZ_{y, o}}{d\xi} \right|_{\xi=0} > 0$, следовательно $Z_{y, o}$ возрастает и при отрицательном minimum'e.

Примечание. Левая граница хребта, ближайшая к поверхности земли, лежит на вертикали, проходящей на половине расстояния между нулевыми точками $H_{y, o}$ (рис. 3) или, что то же, через нулевую точку $Z_{y, o}$.

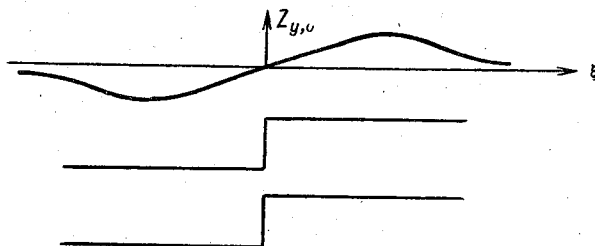


Рис. 4.

Поле $\bar{I}_x$. Из формул (11) и (12) находим, что

$$H_{x, o} = B \left[\arctg \frac{d_1}{\xi} - \arctg \frac{d_2}{\xi} - \arctg \frac{d_3}{\xi} + \arctg \frac{d_4}{\xi} \right]$$

и

$$Z_{x, o} = \frac{1}{2} B \ln \frac{(\xi^2 + d_1^2)(\xi^2 + d_4^2)}{(\xi^2 + d_2^2)(\xi^2 + d_3^2)}.$$

Отметим, что нулевая точка и точки extrema $H_{x, o}$ совпадают с таковыми для $Z_{y, o}$, а нулевые точки и точки extrema $Z_{x, o}$ совпадают с таковыми же для $H_{y, o}$.

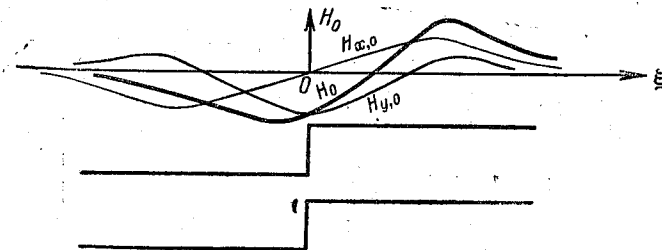


Рис. 5.

Таким образом графики $H_{x, o}$ и $Z_{x, o}$ оказываются аналогичными графикам $Z_{y, o}$ и $H_{y, o}$ и отличаются от последних размерами координат.

Поле $\bar{I}$. Имеем

$$H_0 = H_{y, o} + H_{x, o}; \quad (*)$$

$$Z_0 = Z_{y, o} + Z_{x, o}. \quad (**)$$

Точное исследование H_0 и Z_0 в силу трансцендентности уравнений (*) и (**) невозможно. Пользуясь же исследованными $H_{y,0}$ и $H_{x,0}$, а также $Z_{y,0}$ и $Z_{x,0}$, можно дать схематическое изображение распределения H_0 и Z_0 вдоль прямой OO , которое и представится в виде следующего графика (рис. 5). Аналогичный график будет и для Z_0 . По графику H_0 (а также и Z_0) можно утверждать, что нулевая точка H_0 (или Z_0) находится над частью хребта, ближайшей к поверхности земли. Область положительных значений H_0 или Z_0 (так же как и некоторые отрицательные значения) определяет ближайшее расположение хребта к поверхности земли.

II. ОБРАТНАЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА

§ 4. Определение элементов прямого сброса

Мы даем решение обратной задачи для поля I_y . Неизвестными величинами являются глубины залеганий d_1, d_2, d_3, d_4 и величина A , содержащая величину вектора I_y . Для нахождения их воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d_1}{a^2 + d_1^2} - \frac{d_2}{a^2 + d_2^2} - \frac{d_3}{a^2 + d_3^2} + \frac{d_4}{a^2 + d_4^2} = \\ = \frac{a}{a^2 + d_1^2} - \frac{a}{a^2 + d_2^2} - \frac{a}{a^2 + d_3^2} + \frac{a}{a^2 + d_4^2}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$A \left(\frac{a}{a^2 + d_1^2} - \frac{a}{a^2 + d_2^2} - \frac{a}{a^2 + d_3^2} + \frac{a}{a^2 + d_4^2} \right) = \alpha; \quad (18)$$

$$A \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4} \right) = \beta; \quad (19)$$

$$d_2 d_3 + d_1 d_4 = \frac{\gamma^2}{2}; \quad (20)$$

$$d_2 - d_1 = d_4 - d_3. \quad (21)$$

Уравнение (17) получается из условия:

$$\left. \frac{dZ_{y,0}}{d\xi} \right|_{\xi=a} = \left. \frac{dH_{y,0}}{d\xi} \right|_{\xi=a}.$$

Точка a определяется из измерений на местности.

Уравнения (18) и (19) составляются из измерения соответственно $\frac{dH_{y,0}}{d\xi}$ и $\frac{dZ_{y,0}}{d\xi}$ в точке $\xi = a$.

Уравнение (20) получается в результате измерения расстояния между нулевыми точками $H_{y,0}$.

Из формулы (13) имеем:

$$2 \sqrt{\frac{d_3^2 d_2^2 - d_4^2 d_1^2}{(d_4^2 - d_3^2) - (d_2^2 - d_1^2)}} = \gamma,$$

откуда и получается уравнение (20).

Уравнение (21) вытекает из основного условия, что толщина обеих частей сброса одинакова.

Точное решение написанной выше системы невозможно ввиду высокого ее порядка. Мы применим следующий приближенный способ.

Положим, что $d_3 \rightarrow \infty$ и $d_4 \rightarrow \infty$. Это равносильно рассмотрению одной (правой) части сброса. Найденные при этом предположении d_1, d_2 и A будут точными для

полусброса, если α , β и a считать величинами, относящимися к тому же полусбросу. Если же α , β и a величины, создаваемые обеими частями сброса, то d_1 , d_2 и A , которые будут найдены в предположении, что $d_3 \rightarrow \infty$ и $d_4 \rightarrow \infty$, окажутся для поля всего сброса величинами приближенными. Вставляя же последние в уравнения (20) и (21), найдем первые приближения для d_3 и d_4 .

Итак, полагаем $d_3 \rightarrow \infty$ и $d_4 \rightarrow \infty$. Тогда предельные уравнения для (17), (18) и (19) примут вид:

$$\frac{d_1}{a^2 + d_1^2} - \frac{d_2}{a^2 + d_2^2} = \frac{a}{a^2 + d_1^2} - \frac{a}{a^2 + d_2^2}; \quad (17')$$

$$A \left(\frac{a}{a^2 + d_1^2} - \frac{a}{a^2 + d_2^2} \right) = \alpha; \quad (18')$$

$$A \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) = \beta. \quad (19')$$

Преобразуя эту систему и деля уравнение (18') на уравнение (19'), получим систему:

$$a^2 + a(d_1 + d_2) - d_1 d_2 = 0; \quad (17'')$$

$$\frac{a(d_1 + d_2)d_1 d_2}{a^4 + a^2(d_1^2 + d_2^2) + d_1^2 d_2^2} = \frac{\alpha}{\beta}. \quad \left(\begin{matrix} 18' \\ 19' \end{matrix} \right)$$

Полагая $d_1 + d_2 = x$ и $d_1 d_2 = y$ и решая систему

$$a^2 + ax - y = 0;$$

$$\frac{axy}{a^4 + a^2 x^2 - 2a^2 y + y^2} = \frac{\alpha}{\beta},$$

найдем

$$y = \frac{2\alpha a^2}{2\alpha - \beta} \quad \text{и} \quad x = \frac{a\beta}{2\alpha - \beta},$$

причем решение $y=0$ и $x=0$ отбрасываем, как не удовлетворяющее задаче.

Зная x и y , верно найдем d_1 и d_2 .

$$d_1^{(1)} = a \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 8\alpha(2\alpha - \beta)}}{2(2\alpha - \beta)} \quad \text{и} \quad d_2^{(1)} = a \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 8\alpha(2\alpha - \beta)}}{2(2\alpha - \beta)},$$

где $d_1^{(1)}$ и $d_2^{(1)}$ обозначают первые приближения d_1 и d_2 .

Величина $A^{(1)}$ (первое приближение) найдется из уравнения (19'):

$$A^{(1)} = \frac{2\alpha - \beta}{\sqrt{\beta^2 - 8\alpha(2\alpha - \beta)}}.$$

Подкоренное выражение $\beta^2 - 8\alpha(2\alpha - \beta) > 0$. Это можно показать следующим образом. Из $d_1 d_2 = \frac{2\alpha a^2}{2\alpha - \beta}$ найдем сперва 2α , а затем, пользуясь (17), найдем

$2\alpha - \beta = \frac{a\beta}{d_1 + d_2}$. Вставляя их в подкоренное выражение, получим, что

$$\beta^2 - 8\alpha(2\alpha - \beta) = \frac{\beta^2(d_2 - d_1)^2}{(d_2^2 + d_1^2)} > 0.$$

Имея первые приближения $d_1^{(1)}$, $d_2^{(1)}$ и $A^{(1)}$, найдем из уравнений (20) и (21) первые приближения $d_3^{(1)}$ и $d_4^{(1)}$.

§ 5. Уточнение результатов

1-й способ

Способ, применяемый здесь, сходен со способом Ньютона. Однако мы разлагаем в ряд Тейлора не левые¹ части уравнений (17) — (21), а функцию $H_{y, o}$. Это значительно уменьшает число выкладок.

Измеряем $H_{y, o}$ в какой-либо точке a_1 . С другой стороны, по формуле:

$$H_{y, o} = \frac{1}{2} A \ln \frac{(\xi^2 + d_1^2)(\xi^2 + d_4^2)}{(\xi^2 + d_2^2)(\xi^2 + d_3^2)}$$

вычисляем в той же точке $\xi = a_1$ значение $H_{y, o}$ в соответствии с первыми приближениями $d_1^{(1)}$, $d_2^{(1)}$, $d_3^{(1)}$ и A . Будем иметь

$$H_{y, o} \text{ (измеренная)} - H_{y, o} \text{ (вычисленная)} = \Delta H_{y, o}^{(1)}.$$

Подробнее:

$$H_{y, o}(A, d_1, d_2, d_3, d_4) - H_{y, o}(A^{(1)}, d_1^{(1)}, d_2^{(1)}, d_3^{(1)}, d_4^{(1)}) = \Delta H_{y, o}^{(1)}. \quad (*)$$

Разлагаем $H_{y, o}$ в ряд Тейлора:

$$H_{y, o}(A, d_1, d_2, d_3, d_4) = H_{y, o}(A^{(1)}, d_1^{(1)}, d_2^{(1)}, d_3^{(1)}, d_4^{(1)}) + \\ + \left[\sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial H_{y, o}}{\partial d_i} dd_i + \frac{\partial H_{y, o}}{\partial A} dA \right]. \quad (**)$$

Отсюда имеем приближенное равенство:

$$\sum_{i=1}^{i=4} \frac{\partial H_{y, o}}{\partial d_i} dd_i + \frac{\partial H_{y, o}}{\partial A} dA = \Delta H_{y, o}^{(1)}, \quad (22)$$

где $\frac{\partial H_{y, o}}{\partial d_i}$ и $\frac{\partial H_{y, o}}{\partial A}$ величины, вычисленные для найденных значений $d_1^{(1)}$, $d_2^{(1)}$, $d_3^{(1)}$, $d_4^{(1)}$, $A^{(1)}$ и при $\xi = a_1$. Значение $\Delta H_{y, o}^{(1)}$ известно из формулы (*). Таким образом уравнения (22) могут служить для приближенного определения поправок $dd_i^{(1)}$ и $dA^{(1)}$.

Составив пять таких уравнений для пяти точек наблюдений $\xi = a_1, \dots, a_5$, можем определить $dd_i^{(1)}$ и $dA^{(1)}$. Тогда вторые приближения искомых элементов будут

$$d_i^{(2)} = d_i^{(1)} + dd_i^{(1)} \\ A^{(2)} = A^{(1)} + dA^{(1)} \quad (i = 1, 2, 3, 4).$$

Поступая аналогично и в дальнейшем, можем отыскать $d_i^{(3)}$ и $A^{(3)}$ и т. д.

Отметим, что при применении этого способа необходимо, чтобы детерминант

$$D = \begin{vmatrix} \left. \frac{\partial H_{y, o}}{\partial d_1} \right|_{\xi=a_1} & \dots & \left. \frac{\partial H_{y, o}}{\partial d_4} \right|_{\xi=a_1} & \dots & \left. \frac{\partial H_{y, o}}{\partial A} \right|_{\xi=a_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left. \frac{\partial H_{y, o}}{\partial d_1} \right|_{\xi=a_5} & \dots & \left. \frac{\partial H_{y, o}}{\partial d_4} \right|_{\xi=a_5} & \dots & \left. \frac{\partial H_{y, o}}{\partial A} \right|_{\xi=a_5} \end{vmatrix} \neq 0$$

не был бы слишком мал, так как в противном случае поправки dd_i и dA окажутся сравнительно большими и такими, что в ряде (**) нельзя будет пренебречь их вторыми степенями, как это мы сделали при составлении приближенного равенства (22).

¹ Считаем, что все члены правых частей перенесены в левые.

2-й способ

Приведенный способ итерации распространен на систему уравнений со многими неизвестными.

После перенесения всех членов уравнений (17)...(21) в левые части запишем эти уравнения символически:

$$F_1 = 0; \quad (17)$$

$$F_2 = 0; \quad (18)$$

$$F_3 = 0; \quad (19)$$

$$F_4 = 0; \quad (20)$$

$$F_5 = 0. \quad (21)$$

Умножаем эти уравнения соответственно на a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , которые суть пока неопределенные числа. Составляем уравнение:

$$A = A + a_1 F_1 + \dots + a_5 F_5. \quad (17_1)$$

Умножая те же уравнения соответственно сперва на $b_1, \dots, b_5$, потом на $c_1, \dots, c_5$, затем на $e_1, \dots, e_5$ и наконец на $f_1, \dots, f_5$, составляем уравнения, равносильные уравнениям (18), (19), (20) и (21).

$$d_1 = d_1 + b_1 F_1 + \dots + b_5 F_5; \quad (18_1)$$

$$d_2 = d_2 + c_1 F_1 + \dots + c_5 F_5; \quad (19_1)$$

$$d_3 = d_3 + e_1 F_1 + \dots + e_5 F_5; \quad (20_1)$$

$$d_4 = d_4 + f_1 F_1 + \dots + f_5 F_5. \quad (21_1)$$

Уравнения (17₁)—(21₁) дадут вторые приближения для A, d_1, d_2, d_3, d_4 , если их первые приближения подставить в правые части. Чтобы это было возможно и результаты вторых приближений были более точны, необходимо предварительно определить коэффициенты ($a_1, \dots, a_5, b_1, \dots, b_5$ и т. д.) таким образом, чтобы значения частных производных от правых частей уравнений (17₁)—(21₁) при $A^{(1)}, d_1^{(1)}, \dots, d_4^{(1)} = 0$ были < 1 или лучше всего близки к нулю.

Берем от правой части уравнения (17₁) пять частных производных по $A, d_1, \dots, d_4$ и по подстановке в них $A^{(1)}, d_1^{(1)}, \dots, d_4^{(1)}$ считаем их приближенно равными нулю. Таким образом будем иметь пять приближенных уравнений для определения $a_1, \dots, a_5$:

$$1 + a_1 \frac{\partial F_1}{\partial A} + \dots + a_5 \frac{\partial F_1}{\partial A} = 0;$$

$$a_1 \frac{\partial F_1}{\partial d_1} + \dots + a_5 \frac{\partial F_1}{\partial d_1} = 0;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$a_1 \frac{\partial F_1}{\partial d_4} + \dots + a_5 \frac{\partial F_1}{\partial d_4} = 0.$$

Аналогично найдем: $b_1, \dots, b_5$ и т. д.

При найденных значениях неопределенных коэффициентов можно по уравнениям (17₁)—(21₁) с желаемой степенью точности найти приближенные значения A, d_1, d_2, d_3 и d_4 .

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Neumann. Untersuchungen über das logarithmische und Newton'sche Potential, 1877.
2. E. Mathieu. Theorie des Potentials und ihre Anwendungen auf Electrostatik und Magnetismus, S. 300, 303, 1890.
3. В. Стеклов. Основные задачи математической физики, ч. II, стр. 21, 1923 г.
4. А. Попов. Магнитное поле косо го сброса.

THE MAGNETIC FIELD OF A STRAIGHT FAULT

By *A. Popoff*

Summary

In the present paper the author investigates the direct and inverse magnetic problems of a magnetic field created by a ridge in the form of a straight fault.

In solving the direct problem the author proceeds from the presumption that the ridge, possessing the form of a straight fault with an unlimited contour of its cross-section in the form of two rectangular semi-belts, is situated in a homogeneous magnetic field, the direction of which lies in the normal section of the ridge.

In order to find the potential of the magnetic field and the gradients the author applies, for the solution of the principal integral equation, the method of successive approximations, after which he constructs the columns illustrating the approximate expressions received of the values sought for.

In the inverse problem the author regards the depths of the occurrence of the magnetic masses as unknown. In order to find these depths he solves a certain system of equations (17) — (21), and after this he defines more accurately, by two different methods, the results obtained.

РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ROBIN'A—POINCARÉ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЛАСТЕЙ

В настоящей работе дается решение плоской задачи Robin'a—Poincaré для некоторого класса областей, ограниченных аналитическими кривыми указанного ниже вида.

Хотя рассматриваемые области составляют весьма небольшой класс, но довольно разнообразны, и решение задачи для них представляет значительный интерес как с математической точки зрения, так и для приложений, так как в настоящее время точное решение известно лишь для некоторых простейших контуров.

§ 1. Граничные условия задачи

Задачу формулируем следующим образом: найти функции $V_k(u, v)$, $k = 1, 2, \dots, N+1$, гармонические в соответствующих областях, полученные путем проведения на плоскости (u, v) простых замкнутых контуров и удовлетворяющие на каждом контуре C_k условиям

$$V_m = V_j; \quad (1)$$

$$\mu_m \frac{\partial V_m}{\partial n_m} + \mu_j \frac{\partial V_j}{\partial n_j} = (\mu_j - \mu_m) f_k, \quad (2)$$

где m и j представляют номера областей, для которых контур C_k является границей, μ_m и μ_j — заданные положительные постоянные, а f_k — заданная на контуре функция, удовлетворяющая условию:

$$\int_{C_k} f_k dl = 0. \quad (3)$$

В такой постановке эта задача встречается в различных отделах математической физики, в частности в теории упругости (кручение составных брусков) и главным образом при изучении распределения магнитных и электрических полей.

Известно, что для искомых функций можно составить систему интегро-дифференциальных или интегральных уравнений типа Fredholm'a. Решение этих уравнений можно получить, применяя метод последовательных приближений; однако получающиеся при этом ряды сходятся достаточно быстро лишь при значениях μ_k близких друг к другу, что далеко не удовлетворяет требований практики.

Решение Fredholm'a для таких задач также оставляет желать много лучшего с точки зрения приложений, заставляя искать более простые решения для определенных классов частных случаев.

Пусть $w = u + iv$ есть функция комплексной переменной $z = x + iy = re^{i\varphi}$, имеющая вид:

$$w = \frac{\alpha_1 \left(z + \frac{1}{z} \right) + \alpha_2}{\alpha_3 \left(z + \frac{1}{z} \right) + \alpha_4}, \quad (4)$$

где $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ — вещественные или комплексные постоянные.

Эта функция конформно отображает круг $|z| < 1$ на плоскость w с разрезом по дуге окружности, соответствующим окружности $|z| = 1$.

Мы дадим весьма простое решение поставленной задачи, когда контуры C_k соответствуют на плоскости z окружностям:

$$|z| = r_k < 1, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

Эти контуры имеют довольно разнообразный вид в зависимости от положения единственного в круге $|z| < 1$ простого полюса функции (4) и значений r_k в равенстве (5).

Искомые функции V_k могут рассматриваться как вещественные части некоторых аналитических, в соответствующих областях, функций $F_k(w)$.

Установим, каким условиям на контурах C_k будут удовлетворять эти функции.

Очевидно, в силу условия (1), на контуре C_k должны иметь:

$$R F_m(w) = R F_j(w), \quad (6)$$

где R — знак вещественной части.

Далее, установив обычным способом положительное направление обхода контура C_k и обозначив касательную к контуру через T , а гармонические функции, сопряженные с V_k , через V_k^* , представим условие (2) в следующем виде:

$$\mu_m \frac{\partial V_m^*}{\partial T} - \mu_j \frac{\partial V_j^*}{\partial T} = (\mu_j - \mu_m) f_k.$$

Интегрируя это равенство по части контура C_k от какой-нибудь точки w_0 до точки w , найдем, что V_m^* и V_j^* на контуре удовлетворяет условию:

$$\mu_m V_m^* - \mu_j V_j^* = \frac{1}{2i} \Psi_k(w) (\mu_j - \mu_m), \quad (7)$$

где

$$\frac{1}{2i} \Psi_k(w) = \int_{w_0}^w f_k dl + \mu_m V_m^*(w_0) - \mu_j V_j^*(w_0),$$

а $V_m^*(w_0)$ и $V_j^*(w_0)$ представляют значения V_m^* и V_j^* в точке $w = w_0$, причем функция $\Psi_k(w)$ однозначна и непрерывна на контуре в силу условия (3).

Кроме того, поскольку искомые функции, как известно, определяются с точностью до не имеющих значения постоянных слагаемых, мы без ограничения общности можем положить:

$$V_m^*(w_0) = V_j^*(w_0) = 0$$

и определить функцию $\Psi_k(w)$ при помощи соотношения:¹

$$\Psi_k(w) = 2i \int_{w_0}^w f_k dl. \quad (8)$$

Таким образом введенные функции $F_m(w)$ и $F_j(w)$ должны на контуре удовлетворять условию:

$$\mu_m I F_m(w) - \mu_j I F_j(w) = \frac{1}{2} (\mu_j - \mu_m) \Psi_k(w), \quad (9)$$

где I — знак мнимой части.

Полученные граничные условия (6) и (9) удобнее представить в виде:

$$F_m(w) + \overline{F_m(w)} = F_j(w) + \overline{F_j(w)}; \quad (10)$$

$$\mu_m [F_m(w) - \overline{F_m(w)}] - \mu_j [F_j(w) - \overline{F_j(w)}] = (\mu_j - \mu_m) \Psi_k(w). \quad (11)$$

¹ В задачах о распределении магнитных полей $\Psi_k(w)$ представляет удвоенную мнимую часть комплексного намагничивающего потенциала.

Здесь, как обычно, $\overline{F_m(w)}$ и $\overline{F_j(w)}$ — комплексные, сопряженные с $F_m(w)$ и $F_j(w)$.

Отметим также, что вследствие условия (3) функции $F_k(w)$ должны быть однозначны в соответствующих областях.

Рассмотрим теперь функции:

$$\psi_k(z) = \Psi_k(w(z)) \quad (k = 1, 2 \dots N); \quad (12)$$

$$f_k(z) = F_k(w(z)) \quad (k = 1, 2 \dots N+1), \quad (13)$$

где $w(z)$ определена формулой (4).

Первые из них можно считать заданными на окружностях $|z| = r_k$.

Они на этих окружностях однозначны и непрерывны и принимают лишь чисто мнимые значения.

Каждая функция $f_k(z)$ должна быть однозначной аналитической в соответствующем кольце, не исключая и точки z , являющейся единственным простым полюсом $w(z)$ в круге $|z| < 1$, причем, изменяя соответствующим образом нумерацию, мы можем считать, что $f_k(z)$ аналитическая в кольце

$$r_{k-1} < |z| < r_k, \quad k = 2, 3 \dots N+1,$$

а функция $f_1(z)$ в круге $|z| < r_1$.

На основании условий (10) и (11) новые искомые функции $f_k(z)$ на соответствующих окружностях $|z| = r_k$ очевидно должны удовлетворять условиям:

$$\begin{aligned} f_k(z) + \overline{f_k(z)} &= f_{k+1}(z) + \overline{f_{k+1}(z)}; \\ \mu_k [f_k(z) - \overline{f_k(z)}] - \mu_{k+1} [f_{k+1}(z) - \overline{f_{k+1}(z)}] &= \begin{cases} z = r_k e^{i\varphi} \\ k = 1, 2 \dots N. \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

$$= (\mu_{k+1} - \mu_k) \psi_k(z) \quad (15)$$

Однако для их определения этих условий недостаточно. Именно, функция $F_{N+1}(w)$ должна быть однозначной и аналитической в своей области всюду, включая и разрез, который согласно преобразованию (4) соответствует окружности $|z| = 1$. Соответствующим свойством должна обладать и функция $f_{N+1}(z)$.

Пусть некоторой точке, лежащей на одном из берегов разреза плоскости w , соответствует точка z на окружности $|z| = 1$, а той же точке плоскости w , но лежащей на другом берегу разреза, соответствует точка z^* на той же окружности. Тогда функция $F_{N+1}(w)$ очевидно будет удовлетворять поставленному требованию, если $f_{N+1}(z)$ не будет иметь особенностей на круге $|z| = 1$, т. е. будет однозначной аналитической в кольце:

$$r_N < |z| < 1 + \epsilon, \quad (16)$$

где $\epsilon > 0$, и, кроме того, если она будет удовлетворять дополнительному условию на круге $|z| = 1$:

$$f_{N+1}(z) = f_{N+1}(z^*). \quad (17)$$

Действительно, тогда значения $F_{N+1}(w)$ на разных берегах разреза будут совпадать и, по принципу Riemann'a—Schwarz'a, представлять аналитическую функцию в неразрезанной области.

Нетрудно убедиться, например, при помощи интеграла Cauchy, что $F_{N+1}(w)$ при этом не будет иметь особенностей и на концах разреза.

Решение задачи для рассматриваемых областей получается весьма простым, потому что, если $w(z)$ имеет вид (4), то легко удовлетворить условию (17).

Именно, в рассматриваемом случае имеем соотношение:

$$w(z) = w\left(\frac{1}{z}\right), \quad (18)$$

поэтому на круге $|z|=1$:

$$z^* = \frac{1}{z} = \bar{z}, \quad (19)$$

так что условие (17) примет вид:¹

$$f_{N+1}(z) = f_{N+1}(\bar{z}), \quad |z|=1. \quad (20)$$

§ 2. Построение решения

Теперь мы можем найти искомые функции $f_k(z)$. Именно, поскольку каждая из них является однозначной аналитической в соответствующем кольце, то они разлагаются в ряды Лорана:

$$f_k(z) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{k,n} z^n + \sum_{n=1}^{\infty} a_{k,-n} z^{-n}, \quad k=2, 3 \dots N+1, \quad (21)$$

а для функции $f_1(z)$ будем иметь разложение:

$$f_1(z) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{1,n} z^n, \quad (22)$$

причем свободные члены в этих разложениях для простоты положены равными нулю, согласно сделанному замечанию, что искомые функции Y_k определяются с точностью до произвольных постоянных слагаемых.

Подставляя разложение для $f_{N+1}(z)$ в соотношении (20) и сравнивая коэффициенты при одинаковых степенях z или $\bar{z}$, получим:

$$a_{N+1,n} = a_{N+1,-n} \quad n=1, 2 \dots \quad (23)$$

Затем, при $z = r_k e^{i\varphi}$ имеем:

$$\bar{z} = \frac{r_k^2}{z}, \quad (24)$$

поэтому, подставив разложения (21) в условия (14), получим:

$$\bar{a}_{k+1,-n} - \bar{a}_{k,-n} = r_k^{2n} (a_{k,n} - a_{k+1,n}) \quad k=1, 2 \dots N. \quad (25)$$

Наконец, разложим известные на окружностях $|z|=r_k$ функции $\psi_k(z)$ в ряды Фурье:

$$\psi_k(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{k,n} \frac{z^n}{r_k^n}, \quad k=1, 2 \dots N. \quad (26)$$

При этом вследствие того, что $\psi_k(z)$ на окружностях $|z|=r_k$ принимают чисто мнимые значения, коэффициенты $c_{k,n}$ будут удовлетворять соотношениям:

$$c_{k,n} = -\bar{c}_{k,-n}.$$

¹ Других функций $w(z)$, обладающих свойством (18) или (19) и не имеющих в круге $|z|<1$ особенностей, кроме одного простого полюса, не существует. Если же $w(z)$ не обладает свойством (18), то условие (17) приводит к бесконечной системе линейных уравнений для коэффициентов разложений искомых функций, исследовать свойства которых пока не удалось.

следовательно имеем,

$$A_{N,n} =$$

или, после элементарных преобразований,

$$A_{N,n} = -\Delta'_A + \Delta_A A_{0,n}, \quad (30)$$

где

$$\Delta_A = \theta_N^{-n}$$

$$\Delta_A^1 = \theta_N^{-n}$$

Аналогично найдем:

$$B_{N,n} = -\Delta'_B + \Delta_B A_{0,n}, \quad (32)$$

причем Δ'_B и Δ_B могут быть вычислены по формулам (31), если в последних величину θ_N^{-n} заменить на θ_N^n , величины ν_N и λ_N , входящие в последние строки определителей, поменять местами и, наконец, величину $\lambda_N c_{N,n}$ в формуле (31b) заменить на $-\lambda_N c_{N,n}$.

Теперь можем определить коэффициенты $A_{0,n}$. На основании условия (23) должны иметь:

$$\bar{B}_{N,n} = A_{N,n}, \quad B_{N,n} = \bar{A}_{N,n},$$

т. е. на основании (30) и (32), имея в виду, что комплексными являются лишь Δ'_A и Δ'_B , имеем:

$$\Delta_B A_{0,n} - \Delta'_B = -\bar{\Delta}'_A + \Delta_A \bar{A}_{0,n};$$

$$\Delta_B \bar{A}_{0,n} - \bar{\Delta}'_B = -\Delta'_A + \Delta_A A_{0,n},$$

откуда

$$A_{0,n} = \frac{(\Delta'_A - \bar{\Delta}'_B) \Delta_A + (\bar{\Delta}'_A - \Delta'_B) \Delta_B}{\Delta_A^2 - \Delta_B^2}. \quad (33)$$

Таким образом коэффициенты $A_{0,n}$ определены. Зная их, последовательно определим остальные коэффициенты $A_{k,n}$ и $B_{k,n}$ при помощи формул (28) и, таким образом, закончим построение решения задачи.

§ 3. Доказательство сходимости полученных рядов

Докажем, что полученные ряды (21) и (22) сходятся в надлежащих областях одновременно с рядами:

$$S_k = \sum_{n=1}^{\infty} |c_{kn}|.$$

Прежде всего необходимо показать, что при принятых предположениях знаменатель в выражении (33) для $A_{0,n}$ отличен от нуля.

Для доказательства заметим, что Δ_A и Δ_B представляют значения величин $A_{N,n}$ и $B_{N,n}$, полученных из формул (28) в предположении, что все коэффициенты $c_{k,n}$ равны нулю, а $A_{0,n} = 1$. Обозначая эти значения соответственно через $\alpha_{k,n}$ и $\beta_{k,n}$ будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{1,n} \theta_1^n &= \nu_1 \\ \beta_{1,n} \theta_1^{-n} &= \lambda_1 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{k,n} \theta_k^n &= \nu_k \alpha_{k-1,n} + \lambda_k \beta_{k-1,n} \\ \beta_{k,n} \theta_k^{-n} &= \nu_k \beta_{k-1,n} + \lambda_k \alpha_{k-1,n} \end{aligned} \right\} \quad k=2, 3, \dots, N \quad (35)$$

$$\alpha_{N,n} = \Delta_A, \quad \beta_{N,n} = \Delta_B$$

Согласно обозначениям (29) имеем:

$$\nu_1 > |\lambda_1|,$$

следовательно, на основании (34),

$$\alpha_{1,n} > |\beta_{1,n}| \theta_1^{-2n} > 0,$$

поэтому

$$\alpha_{1,n} \pm \beta_{1,n} > 0, \quad (n=1, 2, \dots).$$

Нетрудно видеть, что таким же неравенствам удовлетворяют и остальные величины $\alpha_{k,n}$ и $\beta_{k,n}$.

Действительно, пусть $\alpha_{k-1,n} \pm \beta_{k-1,n} > 0$. Тогда складывая или вычитая почленно выражения (35) и учитывая (29), получим:

$$\begin{aligned}\alpha_{k,n} \theta_k^n + \beta_{k,n} \theta_k^{-n} &= \alpha_{k-1,n} + \beta_{k-1,n} > 0; \\ \alpha_{k,n} \theta_k^n - \beta_{k,n} \theta_k^{-n} &= (\nu_k - \lambda_k) (\alpha_{k-1,n} - \beta_{k-1,n}) > 0,\end{aligned}$$

откуда, очевидно, следует, что

$$\alpha_{k,n} > |\beta_{k,n}| \theta_k^{-2n} \quad (36)$$

и в частности

$$\alpha_{k,n} \pm \beta_{k,n} > 0. \quad (37)$$

Поскольку предположение, что $\alpha_{k-1,n} \pm \beta_{k-1,n} > 0$ справедливо при $k-1=1$, то и неравенства (36) и (37) имеют место для всех $k=2, 3, \dots, N$.

При $k=N$ имеем:

$$\alpha_{N,n} = \Delta_A > |\beta_{N,n}| \theta_N^{-2n} = |\Delta_B| \theta_N^{-2n}, \quad (38)$$

следовательно

$$\Delta_A^2 - \Delta_B^2 > \Delta_A^2 (1 - \theta_N^{2n}) > 0, \quad (39)$$

что и требовалось.

Докажем теперь, что для коэффициентов $A_{k,n}$ и $B_{k,n}$ при больших n имеет место оценка:

$$A_{k,n} = \frac{\lambda_{k+1}}{\nu_{k+1}} c_{k+1,n} + 0(\theta_k^n + \theta_{k+1}^n), \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$B_{k,n} \theta_n^{-n} = \frac{\lambda_k}{\nu_k} c_{k,n} + 0(\theta_{k-1}^n + \theta_k^n), \quad k=1, 2, \dots, N,$$

где символ $O(x)$ представляет бесконечно малую величину высшего порядка по сравнению с аргументом.

Дадим прежде всего грубую оценку коэффициентов $A_{0,n}$, получаемых по формуле (33).

Очевидно, на основании (39) имеем:

$$A_{0,n} = \frac{\Delta_A^1 - \overline{\Delta_B^1}}{\Delta_A} [1 + 0(1)].$$

Для оценки Δ_A переставим в формуле (31a) столбцы определителя (каждый нечетный со следующим четным) и из нечетных строчек вынесем за знак определителя множители $-\theta_k^{-n}$, а из четных ν_k . Тогда найдем, что Δ_A будет равен произведению $\nu_1 \cdot \nu_2 \dots \nu_N \cdot \theta_1^{-n} \cdot \theta_2^{-n} \dots \theta_N^{-n}$, умноженному на определитель, элементы главной диагонали которого равны единице, а элементы, лежащие вправо от главной диагонали, стремятся к нулю при $n \rightarrow \infty$. Отсюда, очевидно, следует, что

$$\Delta_A = \nu_1 \cdot \nu_2 \dots \nu_N \cdot \theta_1^{-n} \cdot \theta_2^{-n} \dots \theta_N^{-n} [1 + 0(1)],$$

или на основании обозначений (29)

$$\Delta_A = \nu_1 \cdot \nu_2 \dots \nu_N \cdot r_1^{-n} \cdot [1 + 0(1)].$$

Аналогично, принимая во внимание, что коэффициенты $c_{k,n} \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, получим оценку для разности определителей:

$$\Delta_A' - \overline{\Delta_B'} = \Delta_A' [1 + 0(1)] = \lambda_1 c_{1,n} \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 \dots \nu_N \cdot r_1^{-n} \cdot [1 + 0(1)]. \quad (40)$$

Следовательно имеем:

$$A_{N, n} = A_{m, n} \cdot \nu_{m+1} \dots \nu_N \cdot \theta_{m+1}^{-n} \dots \theta_m^{-n} \cdot [1 + o(1)].$$

Аналогично найдем, что

$$B_{N, n} = A_{m, n} \cdot \nu_{m+1} \dots \nu_{N-1} \cdot \lambda_N \cdot \theta_{m+1}^{-n} \dots \theta_{N-1}^{-n} \cdot \theta_N^n [1 + o(1)].$$

Отсюда находим:

$$\frac{A_{N, n}}{B_{N, n}} = \frac{\nu_N}{\lambda_N} \cdot \theta_N^{-2n} \cdot [1 + o(1)].$$

Как видим, это отношение будет как угодно велико при достаточно большом n , следовательно при достаточно большом n равенства (23) не могли бы выполняться, если, как предположено, $A_{m, n}$ остается ограниченным или растет при $n \rightarrow \infty$.

Отсюда заключаем, что $A_{m, n} \rightarrow 0$, если $B_{m, n} \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$.

Но последнее справедливо при $m=1$, поэтому последовательно найдем:

$$\left. \begin{aligned} A_{k, n} &\rightarrow 0 \\ B_{k, n} \theta_k^{-n} &\rightarrow 0 \end{aligned} \right\} n \rightarrow \infty, k = 1, 2 \dots N.$$

Теперь нетрудно получить указанные оценки (41). Действительно, второе из последних соотношений дает:

$$B_{k, n} = o(\theta_k^n),$$

а третья из формул (28) при этом даст:

$$A_{k+1} \theta_{k+1}^n = \nu_{k+1} A_{k, n} + o(\theta_k^n) - \lambda_{k+1} c_{k+1, n} = o(\theta_{k+1}^n),$$

откуда

$$A_{k, n} = \frac{\lambda_{k+1}}{\nu_{k+1}} c_{k+1, n} + o(\theta_k^n + \theta_{k+1}^n), k = 0, 1 \dots N-1,$$

после чего четвертая из указанных формул дает:

$$\begin{aligned} B_{k, n} \theta_k^{-n} &= o(\theta_{k-1}^n) + \lambda_k \left(\frac{\lambda_k}{\nu_k} + 1 \right) c_{k, n} + o(\theta_k^n + \theta_{k-1}^n) = \\ &= \frac{\lambda_k}{\nu_k} c_{k, n} + o(\theta_k^n + \theta_{k-1}^n), k = 1, 2 \dots N. \end{aligned}$$

Отсюда видим, что ряды (21) и (22) на границах соответствующих областей сходятся так же, как и ряды $\sum_{n=1}^{\infty} |c_{k, n}|$.

Для коэффициентов $A_{N, n}$ на основании равенства (23) будем иметь оценку:

$$A_{N, n} \theta_N^{-n} = \frac{\lambda_N}{\nu_N} c_{N, n} + o(\theta_N^n + \theta_{N-1}^n),$$

откуда следует, что ряд Лорана для функции $f_{N+1}(z)$ сходится не только в кольце $r_N < |z| < 1$, но также и в кольце $r_N < |z| < \frac{1}{r_N}$, что достаточно для выполнения условий (16).

§ 4. Частный случай

При $N=1$ имеем простейший случай, когда плоскость $w = u + iv$ делится одним контуром, представляющим инверсию эллипса относительно какой-нибудь точки, на две односвязных области.

Указанный контур соответствует окружности $|z| = r < 1$ на плоскости z . При этом все предыдущие формулы для коэффициентов разложений искомых функций $f_1(z)$ и $f_2(z)$ принимают весьма простой вид:

$$A_{0,n} = \lambda \frac{(\nu r^{-2n} + \lambda r^{2n}) c_n + \bar{c}_n}{\nu^2 r^{-2n} - \lambda^2 r^{2n}};$$

$$\bar{B}_{1,n} = A_{1,n} = \frac{\lambda r^n c_n + \nu r^{-n} \bar{c}}{\nu^2 r^{-2n} - \lambda^2 r^{2n}},$$

причем индексы у величин r , λ , ν и c_n для краткости пропущены.

THE SOLUTION OF THE PLANE ROBIN — POINCARÉ PROBLEM FOR SOME MULTICONNECTED REGIONS

By A. V. Svetlof and V. G. Stroganof

Summary

In this work the solution of the plane Robin—Poincaré problem for multiconnected regions limited by curves has been obtained.

The equations of these curves in the complex form are:

$$w = u + iv = \frac{\alpha_1 \left(z + \frac{1}{z} \right) + \alpha_2}{\alpha_3 \left(z + \frac{1}{z} \right) + \alpha_4};$$

$$z = \rho_k e^{i\varphi}, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad \rho_k = \text{const.}$$

where $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ are real or complex constants.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СЪЕМКОЙ ПРИЧАРСКОЙ ПОЛОСЫ ОСНОВНЫХ ПОРОД

§ 1. Геология района

В 1936 г. партией Института земного магнетизма Главной геофизической обсерватории, по договору с Казахским Геолого-разведочным трестом, была проведена магнитная съемка с гариометром Шмидта в районе Причарской полосы основных пород Восточно-Казахстанской области.

Причарская полоса основных пород протягивается в северо-западном направлении, северо-восточнее Туркестано-Сибирской ж. д. в юго-западной части Калбинского хребта, по правобережью р. Чар. К настоящему времени она прослежена геологической съемкой на протяжении 80—100 км при ширине ее, не превышающей 10—12 км. Геолог А. Г. Гокоев предполагает, на основании нахождения аналогичных основных пород у с. Известкового на р. Иртыше, что основные породы протягиваются с перерывами на 200—300 км.

По петрографическому составу породы Причарской полосы весьма разнообразны. Наибольший интерес представляют серпентиниты (змеевики), образовавшиеся в результате изменения перидотитов. Иногда занимают отдельные участки, иногда разбросаны небольшими гнездами среди серпентинитов габбро. На ряде участков отмечаются пироксениты. Широко распространены листвениты — кварцево-карбонатные породы — и вторичные кварциты, также сильно окварцованные породы, но без карбоната.

Серпентиниты, габбро, пироксениты образовались в результате дифференциации одной и той же магмы и дальнейшего изменения исходных пород. О генезисе же вторичных кварцитов и лиственитов имеются два предположения: некоторые геологи считают [1], что вторичные кварциты — контакт-метасоматические породы — произошли путем преобразования осадочных пород, вмещающих интрузию основных пород; другие [3] считают, что образование лиственитов и вторичных кварцитов — результат метаморфизации ультра-основных пород.

Среди осадочных образований района выделяются две группы. К более древней относятся известняки и кремнистые сланцы; вышележащая состоит из туфо-песчаников, в подчиненном количестве — глинистых сланцев и конгломератов. Простирание осадочных пород колеблется в пределах 290—320°; углы падения пород нижележащей группы крутые, 70—90°, вышележащей — более пологие. Ранее считалось, что известняки и кремнистые сланцы относятся к верхнему силуру, туфо-песчаники — к нижнему карбону. По данным последних работ А. Г. Гокоева [2], устанавливается, что туфо-песчаники относятся к верхнему палеозою (нижней перми), породы же нижележащей свиты — к среднему палеозою (девону и нижнему карбону).

Кроме указанных интрузивных основных пород и пород осадочных, распространены эффузивные основные породы. Среди этих основных эффузивов также выделяют ряд разновидностей, различных по петрографическому составу и условиям залегания. Верхнепалеозойские эффузивы типа порфиритов перекрывают как интрузивные основные породы и осадочные породы среднего палеозоя, так и перм-

ские туфо-песчаники. Различного характера основные эффузивы среднего палеозоя залегают согласно со среднепалеозойскими осадочными породами.

Из кислых изверженных пород в пределах площади магнитной съемки 1936 г. отмечены небольшие участки кварцевых диоритов.

Геологическое строение района усложняется частой перемежаемостью перечисленных пород. Интрузивные основные породы не представляют собой одного сплошного массива или сплошной полосы, как это наблюдается большей частью в районах распространения ультра-основных пород на Урале. Отдельные полосы основных пород перемежаются с породами осадочными, серпентиниты перемежаются с габбро, покрывающие эффузивы закрывают местами контакты между основной интрузией и осадочными породами.

Характер соотношения основных пород с осадочными являлся до последнего времени не установленным, как и почти все другие основные вопросы геологии района. А. Г. Гокоев считает, что основные породы прорывают средний палеозой; высказывалось и предположение о том, что участки осадочных пород среди основных, в том числе осадочных пород среднепалеозойских, — остатки размытого покрова осадочных пород.

Маршрутной геологической съемкой 1935 г. среди серпентинитов Причарской полосы было обнаружено два небольших хромитовых рудных тела. Устанавливалась также перспективная никеленосность района. Поэтому в 1936 г. на всей площади полосы между открытыми рудными телами и далее к юго-западу была проведена более детальная геологическая съемка (масштаба 1:50 000) с поисками и предварительной разведкой хромитовых рудных тел. Для решения задач, стоящих перед геологической съемкой, была привлечена и магнитометрия.

§ 2. Задачи магнитной съемки

Задачей магнитной съемки в Причарском районе было: 1) определение границ полосы основных пород; 2) дифференциация этих пород по магнитному полю.

Применимость магнитного метода для решения первой из указанных задач была несомненна, так как прослеживание контакта основных изверженных пород с породами осадочными неоднократно успешно проводилось в ряде районов Союза — в частности, на Урале и в Закавказье [4, 5]. Магнитное поле над основными породами оказывалось повышенным, с аномальными значениями вертикальной составляющей напряжения магнитного поля Z_a до 3000—4000 γ. При этом оно всегда сложно, характеризуется резкой сменой напряжений; изолинии Z_a имеют причудливый, извилистый характер. Контакт между осадочными породами и основными четко отмечается переходом от спокойного магнитного поля над породами осадочными к неравномерно повышенному полю над породами основными.

Насколько удастся разделение магнитометрией Причарской полосы на отдельные составляющие ее породы, было при постановке съемки менее ясно. Решение этой задачи усложнялось: 1) чрезвычайным разнообразием петрографического состава пород; 2) перемежаемостью основных пород между собой и с породами осадочными. Постепенно в процессе проведения самой работы удалось все же выделить ряд типов магнитного поля, соответствующих определенным породам или группам пород. Более того, оказалось, что магнитная съемка дает материал для решения некоторых неясных и спорных вопросов общей геологии района.

Задача поисков рудных тел не ставилась перед магнитометрией, так как работы по магнитной съемке на других хромитовых месторождениях Союза не приводили к положительным результатам в направлении непосредственных поисков хромита [4, 5].

Можно было, однако, поставить вопрос, нельзя ли использовать магнитную съемку для получения поисковых признаков на хромит. Эта задача не ставилась перед магнитометрией при постановке работы; стремясь все же выяснить применимость магнитного метода в данном районе для ее решения, мы на участках нескольких рудных тел провели более детальные наблюдения, чем на остальной площади. Проведенные работы показывают, что некоторые указания на степень вероятности обнаружения рудных тел на том или ином участке магнитная съемка дать может.

§ 3. Описание работы

Всего произведены были в Причарском районе наблюдения на 3720 пунктах. Из этого числа около 3000 наблюдений проведены по инструментально разбитой сети, на площади 260 км². Наблюдения проводились по профилям, отстоящим на 1000 м и местами на 500 м один от другого, с пунктами по профилям через 100 м и с небольшим числом последующих учащений. Сеть наблюдений показана на прилагаемых картах (рис. 5 и 6).

Кроме того, были проведены маршрутные наблюдения на площади порядка 600—700 км² по четырем маршрутам длиной в 20—25 км каждый и по одному дополнительному маршруту длиной в 8 км. Наблюдения по маршрутам проводились на участках спокойного магнитного поля через 500 м, в аномальных местах — через 250 и 100 м.

На участке Суук-Булакского месторождения хромита на площади 300 × 400 м были проведены наблюдения по детальной сети 20 × 25 м. Детальные наблюдения проведены также на участках Букорского I и Чолобайского хромитовых рудных тел.

Выбор нормального магнитного поля для вычисления аномальных значений вертикальной составляющей Z_a произведен на основании: а) карты нормальных значений Z для 1935 г. по всему Союзу, составленной Институтом земного магнетизма в конце 1936 г.; б) данных наблюдений в крайних частях профилей магнитной съемки, где магнитное поле спокойное. Принято за нормальное значение Z для средней части района (вдоль юго-восточной части магистрали) 52 000 γ.

Введение поправки за нормальный градиент Z произведено также на основании карты нормального Z Союза. Для введения поправки вся площадь съемки была разбита на ряд полос, параллельных юго-восточной части магистрали и имеющих ширину в 2 км каждая; нормальное значение Z каждой следующей такой полосы отличается от нормального значения для соседней полосы на 10 γ.

Результаты наблюдений представлены в виде карт изолиний Z_a и кривых Z_a по профилям и маршрутам съемки. Все прилагаемые кривые Z_a вычерчены в одинаковых масштабах; масштабы эти показаны на рис. 7. Следует отметить, что многие детали магнитного поля, отвечающие соответствующим деталям геологического строения, отмечаются на кривых Z_a , но не отмечаются на карте изолиний — ввиду неизбежности проведения изолиний через сравнительно большие интервалы. Карта изолиний дополняет кривые Z_a , показывая направление простирания пород на отдельных участках; но дифференциация пород по магнитному полю в ряде случаев возможна только по кривым Z_a . Так например, участки магнитного поля с одинаковым средним уровнем Z_a , но с различной степенью изменчивости Z_a от пункта к пункту могут соответствовать различным геологическим объектам, но на карте изолиний разграничены не будут.

§ 4. Дифференциация пород по магнитному полю

Магнитное поле в исследованном районе разделяется на 4 основных разновидности: 1) магнитное поле над осадочными породами; 2) над основными эффузивами; 3) над серпентинитами, габбро, пироксенитами; 4) над вторичными кварцитами, лиственитами, лиственитизированными серпентинитами.

а) Осадочные породы. Магнитное поле над осадочными породами отличается, в первую очередь, равномерностью, малой изменчивостью напряжения от пункта к пункту. Так например, в северо-восточной части маршрута IV (рис. 7) на протяжении 5 км Z колеблется в пределах ± 15 γ. Над основными же породами аномальные напряжения вертикальной составляющей местами порядка 3000—3500 γ, градиент Z достигает 2000 γ на 80 м.

Большей частью над осадочными породами напряжения Z_a около 0, магнитное поле близко к нормальному. На некоторых участках и над осадочными породами Z_a повышенное, что следует объяснять наличием в этих местах основных пород на некоторой глубине, под породами осадочными. Так, в северо-восточной части профилей XX и XXI (рис. 4) над осадочными породами Z_a около 400 γ. Но и на таких участках наблюдается характерная для осадочных пород равномерность, спокойность поля.

Между собой все осадочные породы как среднепалеозойские — кремнистые сланцы, известняки, — так и верхне-палеозойские — туфо-песчаники, конгломераты — для магнитометрии не различимы.

б) Основные эффузивы характеризуются беспокойным магнитным полем, с колебаниями Z от пункта к пункту, но с небольшими, до 400 γ , значениями Z_a . Так, между пунктами —22 и —65 юго-западной части профиля 0 (рис. 1) колебания Z порядка $\pm 150 \gamma$; аналогичен характер магнитного поля в юго-западной части маршрута II (рис. 7) и т. д. Такое магнитное поле, несмотря на небольшую амплитуду колебаний Z , отчетливо отличается от магнитного поля над осадочными породами.

Указанный характер напряжений Z установлен над эффузивами типа порфиритов, относимыми А. Г. Гокеевым к верхнему палеозою; при этом он соответствует тем случаям, когда эти эффузивы залегают над осадочными породами. В том случае, если эффузив лежит на вторичном кварците или, тем более, на серпентините, — магнитное поле будет более повышенным.

в) Серпентиниты, габбро, пироксениты. Серпентинитам соответствует значительно повышенное и резко изменяющееся магнитное поле с аномальными значениями Z порядка 1000—3000 γ . Очень узкие (менее 300 м шириной) полосы серпентинита вызывают Z_a только в 1000—1500 γ ; более значительным серпентинитовым участкам отвечает Z_a с максимумами не менее 2000 γ . Колебания Z при этом чрезвычайно велики; иногда на участках сильно разрушенного серпентинита Z уменьшается почти до нормального уровня. Наиболее часто, однако, над серпентинитами наблюдаются колебания в пределах ± 500 —800 γ от Z_a , равного примерно 2400 γ .

Габбро соответствует несколько более равномерно повышенное магнитное поле, чем серпентинитам, — колебания Z_a , примерно, в пределах ± 300 —500 γ от уровня $Z_a = 1800 \gamma$. Однако разделение габбро от серпентинитов затруднительно, так как: 1) указанный уровень Z_a в пределах колебаний магнитного поля над серпентинитами; 2) местами отдельные гнезда габбро разбросаны среди серпентинитов; на тех же участках, где преобладает габбро, имеют подчиненное распространение и серпентиниты. При применявшейся сети наблюдений разделение габбро от серпентинитов заведомо невозможно.

На некоторых змеевиковых массивах Урала и Закавказья габбро и пироксенитам отвечали участки спокойных, пониженных напряжений Z_a ; массивы габбро магнитометрией отчетливо выделялись, например, на Варшавском и Полтавском змеевиковых массивах на Урале [4]. В районе Причарской полосы основных пород габбро таких минимумов не вызывают. Пироксенитам же, наоборот, соответствуют еще более резкие максимумы Z_a , чем те, которые обычно наблюдаются над серпентинитами. Так, у пункта 6 профиля —IV найден пироксенит, Z_a здесь около 3200 γ ; в юго-западной части профиля —IV напряжения Z_a достигают 3750 γ , геологическая съемка также устанавливает пироксениты и габбро.

г) Вторичные кварциты и листвениты. Вторичные кварциты и листвениты, сходные и по внешнему виду, для магнитометрии совершенно не различимы. Но от серпентинитов их отличает меньшая величина аномальных напряжений, а также и несколько меньшие колебания Z_a . Наиболее частый характер магнитного поля над ними — Z_a , колеблющееся в пределах ± 300 —500 γ около уровня порядка 1000 γ или более низкого.

Нередко серпентиниты выступают в виде „окон“ из-под вторичных кварцитов; можно предполагать, что местами они находятся на некоторой глубине также и под вторичными кварцитами. Таким участкам кварцитов (и лиственитов) соответствуют повышения Z_a до 1200—1500 γ . Вообще переход от магнитного поля, соответствующего серпентинитам, к полю вторичных кварцитов или лиственитов не резок. К той же группе пород, что вторичные кварциты и листвениты, следует отнести по магнитному полю и участки измененных, лиственитизированных серпентинитов. С удалением от серпентинитов Z_a над кварцитами уменьшается до 200—300 γ в наиболее удаленных от них участках.

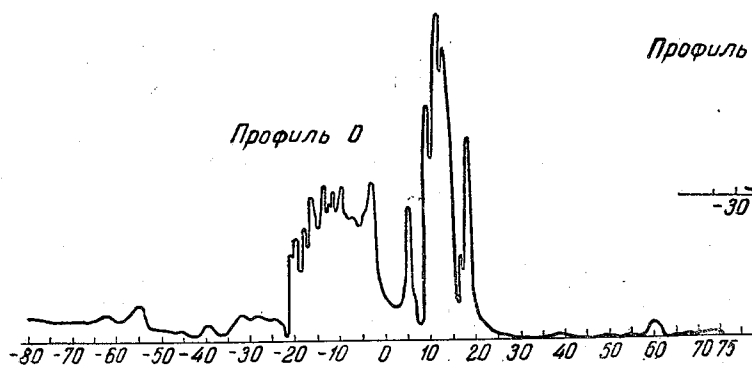
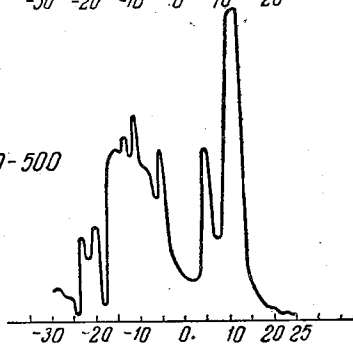
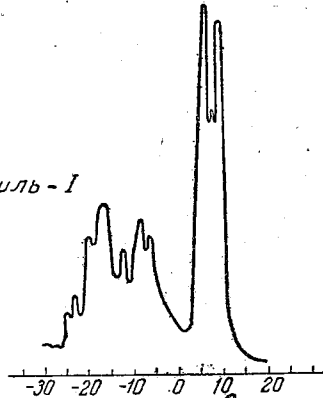


Рис. 1. Кривые Z_a .

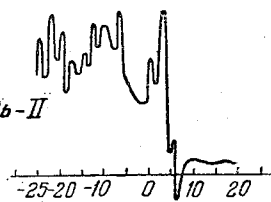
Профиль 0-500



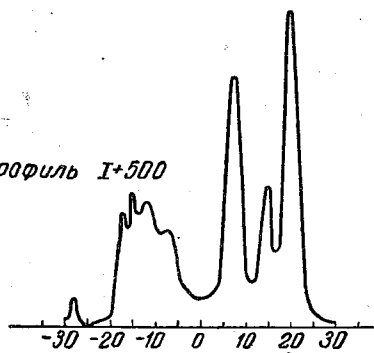
Профиль - I



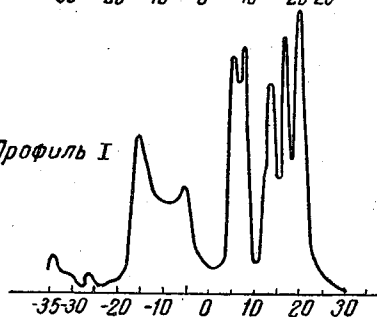
Профиль - II



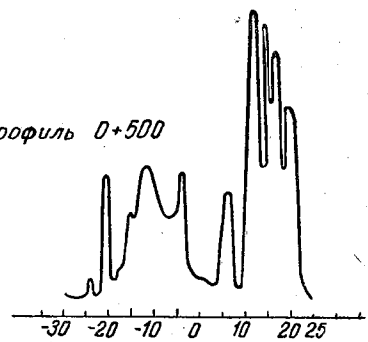
Профиль I+500



Профиль I



Профиль 0+500



Профиль II

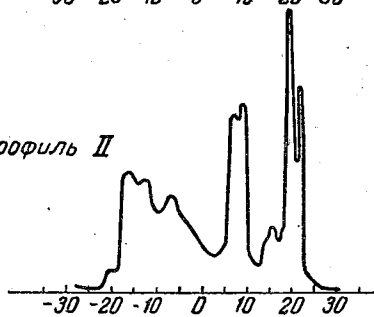


Рис. 2. Кривые Z_a .

От пункта	До пункта	Характер магнитного поля	Данные геологической съемки	Примечания
-----------	-----------	--------------------------	-----------------------------	------------

Северовосточная часть профиля 0 (рис. 1)

— 2	4	Уменьшение Z_a до 300 γ	Кремнистые сланцы	На протяжении нескольких пунктов Z_a не меняется
4	7	Максимум Z_a в 1200 γ	Лиственит	
7	8	Уменьшение Z_a до 140 γ	Известняк и кремнистые сланцы	
8	15	Неравномерно повышенное поле с максимумом $Z_a = 3000$ γ	Серпентинит	На этом участке Суук-Булакское месторождение
15	17	Уменьшение Z_a до 350 γ	Сильно разрушенный серпентинит	
17,5	18,5	Максимум $Z_a = 1850$ γ	Серпентинит	Висячий бок интрузии
18	25	Постепенное уменьшение Z_a до 0	К северо-востоку от пункта 19 сначала известняки, затем кремнистые сланцы и песчаники	
25	75	Спокойное магнитное поле		

Профиль XII (рис. 3)

—80	—70	Z_a от 0 до —40 γ; ровное магнитное поле	Наносы	По данным магнитной съемки осадочные породы
—70	—68	Минимум $Z_a = 100$ γ		
—68	— 5	Неравномерно-повышенное и постепенно повышающееся к северо-востоку Z ; Z_a в основном 500—600 γ	Листвениты, вторичные кварциты и лиственитизированные серпентиниты	Узкая полоса основных пород (серпентиниты)
— 5	12	Сильно повышенное Z ; Z_a до 3000 γ	Серпентиниты с подчиненными им габбро	
12	19	Понижение Z_a до 340 γ	Песчаники	
19	21	Повышение Z_a до 800 γ		Между пунктами 21 и 23—кремнистые сланцы, далее к северо-востоку — песчаники
21	40	Z_a менее 200 γ; спокойное магнитное поле		

Северо-восточная часть профиля XX (рис. 4)

—15	9	Значительно повышенное Z , Z_a до 2750 γ	Серпентинит	По данным магнитометрии основные породы на глубине
9	15	Уменьшение Z_a до —100 γ	Кремнистые сланцы	
15	20	Колебания Z в пределах ± 100 γ от $Z_a = 0$	Основные эффузивы	
20	26	Z_a равномерно изменяется от —100 γ до —200 γ	Кремнистые сланцы	
26	28	Максимум $Z_a = 1160$ γ	Серпентинит	
28	55	Спокойное магнитное поле, Z_a порядка 300—400 γ	Песчаники	

Наблюдениями между пунктами 6—8 профиля — II (рис. 1) и детальными наблюдениями на участке Суук-Булакского месторождения хромита устанавливается, что кислым интрузивным породам типа кварцевых диоритов отвечают понижения Z_a .

Для пояснения сказанного о характере магнитного поля над различными породами рассмотрим кривые вертикальной составляющей по нескольким участкам профилей магнитной съемки, сопоставив их с данными, полученными для тех же направлений геологической съемкой (см. табл. на стр. 42).

Сопоставление с данными геологической съемки данных магнитометрии по профилю XX особенно показательное. Не только значительные максимумы магнитного поля, но и весьма небольшие и на первый взгляд несущественные искажения хода кривой Z_a находят отчетливое геологическое объяснение и, следовательно, могут быть используемы для геологического картирования. Чрезвычайно интересно, что искажение плавности хода кривой Z_a на участке минимума, еще более незначительное, чем на профиле XX (порядка 30—40 γ), отмечается и между пунктами 18 и 20 профилей XIX, XXI и XXII. Это дает нам основание продолжить на схематической геологической карте эффузивы, устанавливаемые геологической съемкой на участке пунктов 15—20 профиля XX, в стороны от этого профиля, — в виде полосы, протягивающейся в том же направлении, в каком простираются осадочные породы.

На некоторых участках расшифровка магнитных данных более затруднена, чем по приведенным профилям. Так, поле над эффузивами сходно с полем над вторичными кварцитами в части их, удаленной от серпентинитов. Небольшим полоскам серпентинитов соответствует такое же магнитное поле, как листовитам и вторичным кварцитам.

Но, во-первых, так как магнитная съемка является лишь одним из методов геологического картирования, сопоставление с данными литологической съемки позволяет часто расшифровать и магнитные данные. Во-вторых, выдержанность геологи-

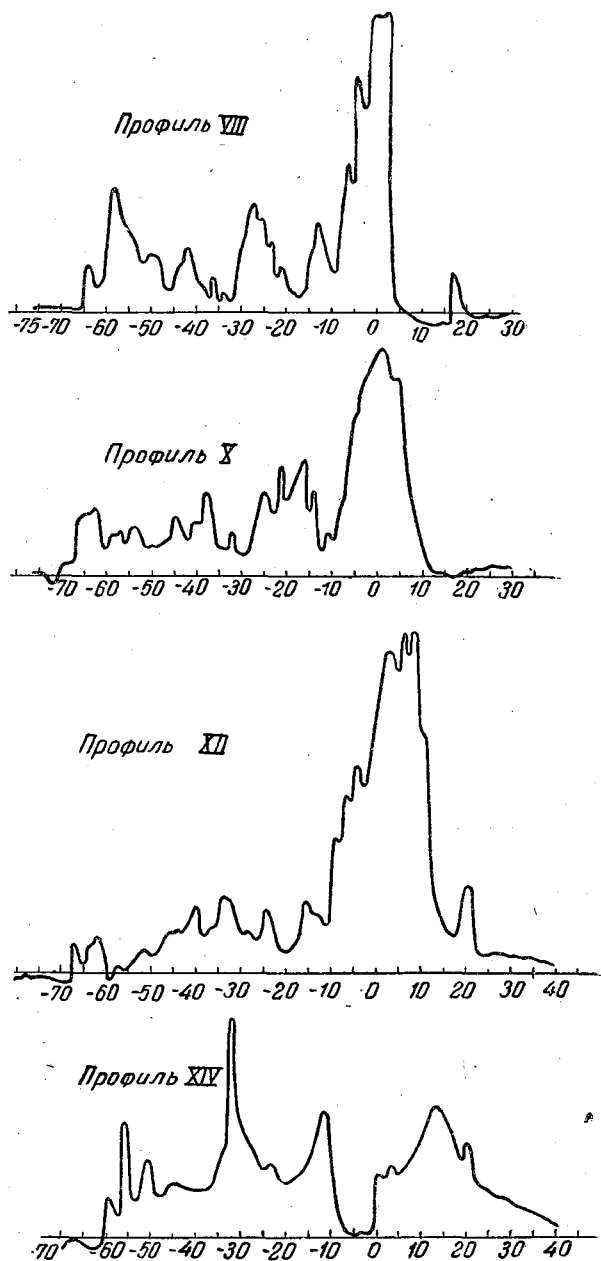


Рис. 3. Кривые Z_a .

ческого строения по простираанию пород позволяет при интерпретации менее показательных профилей использовать данные по соседним более отчетливым профилям. При таком сопоставлении соседних профилей для объяснения того или иного участка магнитного профиля наличием такой же породы, какая отмечена на соответствующем участке соседнего профиля, — следует обращать внимание не столько на значения напряжений Z_a , сколько на подобие отдельных участков кривых Z_a — сходность их по общему виду и отдельным деталям (большая крутизна той или иной ветви и т. п.). В этом отношении характерен, например, минимум, отмечаемый около магистрали на профилях —II, —II, 0—500, 0, 0+500, I, I+500, II (рис. 1 и 2); конфигурация его на всех этих профилях аналогична, напряжение же на профиле —II уменьшается только до 640 γ , а на профиле I — до 220 γ .

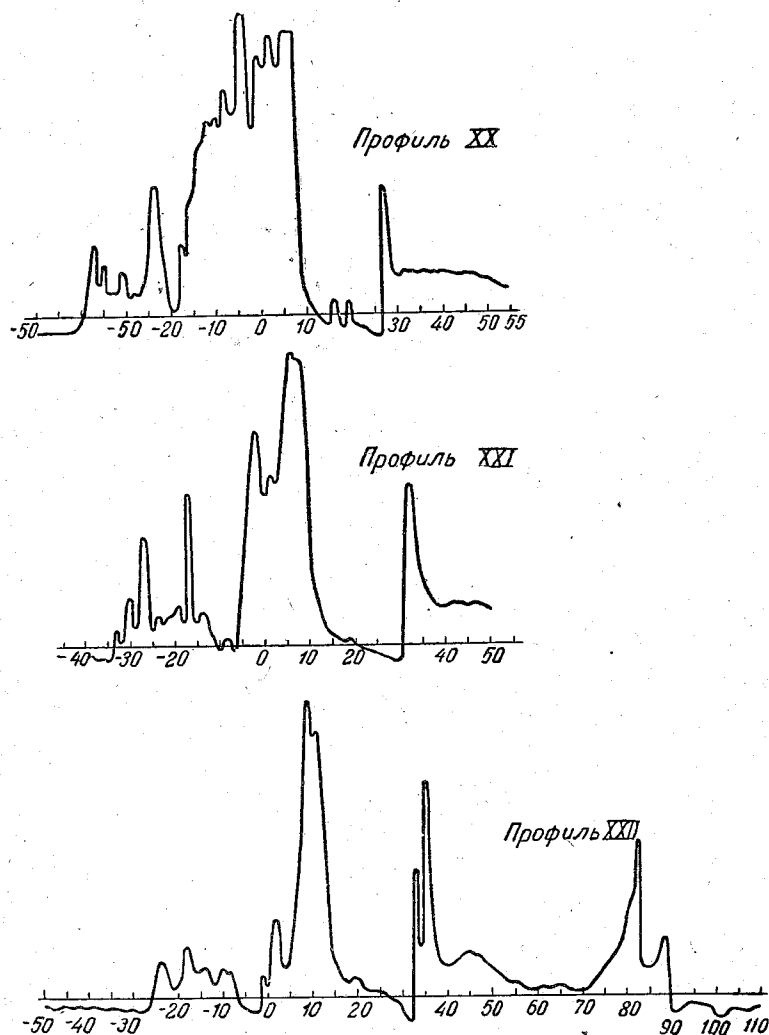


Рис. 4. Кривые Z_a .

§ 5. Геологическая карта района площадной съемки по данным магнитометрии

Прилагаемая схематическая геологическая карта района (рис. 6) составлена по данным магнитной съемки с учетом материалов геологической съемки. В нашем распоряжении имелась предварительная полевая геологическая карта, составленная на

основании работ 1936 г. М. Е. Керенским; данные геологической съемки, показанные на этой карте, были использованы для расшифровки магнитных наблюдений. Однако то из отмеченного на геологической карте, что никак не отражено магнитными наблюдениями, на схематической карте не показано; на тех участках, где данные магнитометрии расходятся с показанным на геологической карте, на схематическую карту наносилось то, что вытекает из данных магнитных.

Составленная геологическая карта названа схематической, так как: 1) дифференциация пород на ней менее подробна, чем обычно даваемая на геологических картах данного района (в частности не разделены между собой осадочные породы); 2) вследствие значительности расстояний между профилями магнитометрией могли быть пропущены некоторые детали геологического строения, отмеченные геологической съемкой. Название „схематическая“ указывает таким образом, что составленная нами карта не предназначена для того, чтобы заменить обычную геологическую карту; она должна лишь облегчить использование данных магнитометрии при составлении геологической карты района. Значение карты, составленной по данным магнитной съемки, в том, что: 1) на ней нет, как на обычных геологических картах, участков, на которых отмечены лишь „наносные образования“; 2) эта карта более отчетливо, чем карта по данным геологической съемки, выявляет на ряде участков основные черты геологического строения.

Ниже рассматривается часть данных магнитометрии о геологическом строении района площадной съемки и сопоставление этих данных с материалами геологической съемки.

Полоса интрузивных основных пород прослеживается на всем протяжении участка площадной съемки (30 км). Максимальная мощность ее, — включая полосы осадочных пород, разделяющие отдельные участки пород основных, — 10—11 км (профили XXII—XXVI), средняя мощность 6—8 км; на участке профилей IV, V, VI она суживается до 4—5 км. Азимут простираения полосы меняется от 330 до 275—280°, в среднем — около 305°.

Линия контакта основных пород с породами осадочными, устанавливаемая магнитометрией, хорошо согласуется с данными геологической съемки. На северо-востоке основные породы уходят под осадочные, уменьшение напряжения магнитного поля менее резко. Граница основных пород, видимая геологической съемкой, отмечается на поверхности с этой стороны полосы, примерно, между изолиниями $Z_a = 500 \gamma$ и $Z_a = 1000 \gamma$. На юго-западе (со стороны лежащего бока интрузии) местами граница основных пород с осадочными закрыта современными отложениями и устанавливается только магнитометрией; там, где она установлена и геологической съемкой, контакт по геологическим данным точно соответствует резкому спаду кривой Z_a . В юго-восточной части площади съемки, вслед за юго-западным контактом основных пород с осадочными, отмечены незначительно пониженные (до —150, —200 γ) по сравнению с нормальными напряжения Z ; здесь за границу полосы основных пород можно принимать изолинию $Z_a = 0$. При этом в юго-западной части некоторых профилей (X, XII, XVI, XVIII) при переходе от аномального магнитного поля к спокойному установлен небольшой участок (200—300 м) дополнительного понижения напряжения на 50—70 γ по сравнению со следующими (далее на юго-запад) пунктами соответствующего профиля. В юго-западной части площади съемки напряжений, пониженных против нормальных, не наблюдается; линия контакта близка к изолинии $Z_a = 500 \gamma$.

С северо-востока и юго-востока полоса основных пород не ограничена. Продолжать магнитную съемку на северо-запад в 1936 г. было затруднительно ввиду отсутствия для этого участка хороших топографических карт, на юго-восток полоса основных пород прослежена маршрутными наблюдениями.

Геологическое строение в пределах полосы основных пород наиболее отчетливо устанавливается по данным магнитометрии в северо-западной части района, на участке, прилегающем к Суук-Булакскому месторождению хромита. При рассмотрении магнитного поля, вдоль профиля 0 уже отмечено понижение Z_a между пунктами —2 и 4, соответствующее полосе кремнистых сланцев среди основных пород. Эта по-

лоса осадочных пород прослеживается также к северо-западу и к юго-востоку от профиля 0 — всего на протяжении 7 км. Выявляется на соседних профилях и узкая полоска осадочных пород, отмечаемая понижением Z_a между 7 и 8 пунктами профиля 0. Таким образом четырёхкратная смена пород на протяжении 1—1½ км, устанавливаемая на профиле 0 (основные породы — осадочные — основные — осадочные — основные), остается неизменной по простиранию на протяжении нескольких километров. На профилях 0 и II, III данные магнитометрии вполне соответствуют данным геологической съемки, на профилях 0—500, —I, I+500, где распространены наносы, дополняют данные геологические; на профилях 0+500, I уточняют геологическую съемку.

Заслуживает далее внимания устанавливаемый магнитометрией изгиб линии контакта серпентинитов с осадочными породами на участке к северо-западу от Суук-Булакского месторождения. Этот изгиб устанавливается и геологической съемкой, но значительно менее отчетливо вследствие распространенности здесь наносных образований.

К юго-западу от Суук-Булакского участка магистрали магнитной съемки геологической съемкой, наряду с лиственитами и вторичными кварцитами, отмечена также полоса серпентинитов. Повидимому эти серпентиниты отличаются от серпентинитов, отмечаемых к северо-востоку от магистрали, — они более лиственитизированы. Напряжения Z_a к юго-западу от магистрали на этом участке нигде не превышают 1400 γ, в основном колеблясь в пределах 1000—1200 γ; к северо-востоку же от магистрали Z_a местами около 3000 γ.

На участке крайних северо-западных профилей (—IV и —III) магнитометрией подтверждается устанавливаемое и геологической съемкой широкое распространение пород группы серпентинитов, габбро и пироксенитов. Основные эффузивы, устанавливаемые геологической съемкой на участке юго-западных концов профилей —I, 0—500, 0, 0+500, I, I+500, отмечаются и на кривых Z_a . Отмечается магнитной съемкой и полоса кремнистых сланцев, показанная на геологической карте к юго-западу от магистрали на участке профилей IV, V.

На участке VI—X профилей как геологическая съемка, так и магнитометрия отмечают изменение азимута простирания полосы основных пород от 330° в Суук-Булакской части района к 300—305° в центральной части его. Магнитные наблюдения в северо-восточной части этих профилей показывают, что изменение простирания полосы происходит в результате плавного изгиба линии северо-восточного контакта основных пород с породами осадочными. Юго-западная линия контакта между VI и VIII профилями резко смещается к югу, а затем восточнее XII профиля становится параллельной северо-восточной.

В пределах полосы основных пород магнитными наблюдениями по VI—XII профилям отмечается, в соответствии с данными геологическими, распространение на большой площади к юго-западу от магистрали лиственитов, вторичных кварцитов и лиственитизированных серпентинитов, а в районе магистрали — серпентинитов и габбро. Небольшие участки серпентинитов, отмеченные геологической съемкой в северо-восточной части профилей VI и VIII, являются по данным магнитометрии продолжением северо-восточной из двух полос основных пород, установленных в районе Суук-Булакского месторождения.

На XIV профиле, вблизи магистрали (к юго-западу от нее), отмечается понижение Z до нормального уровня, соответствующее кремнистым сланцам, установленным геологической съемкой. На участке профиля XIV, к северо-востоку от магистрали, геологической съемкой также установлены кремнистые сланцы; напряжения Z_a , однако, здесь повышенные, — примерно такие, какие обычно соответствуют лиственитам и вторичным кварцитам; эти породы и показаны на этом участке на схематической геологической карте по данным магнитной съемки. Можно допустить и иную расшифровку магнитного поля этого участка; возможно здесь действительно на поверхности — осадочные породы, а на небольшой глубине под ними — серпентиниты, соединяющие полосы серпентинитов, отмечаемые к северо-западу и юго-востоку от профиля XIV.

В юго-западной части XIV—XXII профилей магнитными наблюдениями, как и геологической съемкой, устанавливается большое распространение основных эффузивов и наличие ряда отдельных небольших участков серпентинитов.

В средней части профилей XVIII—XXII установлен один из наиболее значительных участков серпентинита на всей исследованной площади. В северо-восточной части этих профилей магнитометрия и геологическая съемка отмечают небольшую полосу серпентинита, отделенную от более значительной юго-западной полосы участком осадочных пород, пониженного магнитного поля. Мощность этой северо-восточной полосы серпентинита всего около 500 м; однако $Z_{a \max}$, соответствующее ей, на профиле XXII достигает 2200 γ. Полоса устанавливается также на профилях XXI, XX, XVIII (XIX профиль до нее не доходит) и XVII на протяжении 5 км, а затем в районе XVI профиля по данным магнитометрии сливается с более значительной юго-западной полосой. Среди участка кремнистых сланцев, расположенного между этими полосами серпентинитов, протягивается небольшая полоска основных эффузивов.

В крайней юго-западной части профиля XXVI магнитометрия, согласно с геологической съемкой, устанавливает эффузивы. Участки серпентинитов на XXIV и XXVI профилях к юго-западу от магистрали, устанавливаемые геологической съемкой, по данным магнитометрии соединяются в одну полосу. В средней части профилей XXII—XXVI, в районе магистрали, распространены также эффузивы. На участке 4—8 км XXVI профиля и прилегающих частей XXV и XXIV профилей распространены серпентиниты; протяженность серпентинитов на XXVI профиле наибольшая по сравнению со всеми другими профилями площадной съемки. Геологическое строение этого района очень сложно. Все же, в соответствии с данными геологической съемки, по магнитным данным удается установить, что азимут простираения отдельных полос здесь равен около 280°. В этом районе было обнаружено несколько рудных тел; повидимому, этот район при поисках хромита заслуживает и в дальнейшем серьезного внимания.

В северо-восточной части профилей XXII—XXVI магнитометрия вслед за значительным участком осадочных пород вновь отмечает небольшую полосу пород основных, в том числе серпентинитов. Наличие серпентинитов в этом районе было установлено магнитометрией, а затем подтверждено геологической съемкой. Простираение этих полос основных пород около 285° (примерно такое же, как и более значительных полос юго-западных).

§ 6. Маршрутные наблюдения

Маршрутными наблюдениями основные породы прослежены еще на 32 км на юго-восток (всего на 62 км).

Ближайший к участку площадной съемки маршрут I показывает, что к юго-востоку от участка площадной съемки полоса основных пород значительно суживается. Маршрутом I установлено лишь две небольших полосы серпентинитов, шириной 800—1000 м каждая. Повышенные напряжения Z отмечены также к северо-востоку от этих полос, на этом участке основные породы залегают, повидимому, на незначительной глубине под породами осадочными.

Маршрутом II также обнаружены только две небольшие полосы серпентинита, расположенные, примерно, на продолжении к юго-востоку северо-восточной из серпентинитовых полос, обнаруженных маршрутом I. Ширина каждой из этих полос менее 500 м, между ними небольшой участок пониженного напряжения Z . К северо-востоку от этих полос магнитное поле — спокойное, соответствующее осадочным породам. К юго-западу, на всем протяжении маршрута II, характер магнитного поля указывает на распространение основных эффузивных пород.

Маршрутом III устанавливается новое расширение полосы основных пород до 5—6 км. Магнитное поле по этому маршруту очень сложно; магнитная съемка отмечает в пределах общей полосы основных пород целый ряд мелких полос, перемежающихся с породами осадочными. В этом районе в 1936 г. открыто несколько

хромитовых рудных тел; он представляет для поисков хромита весьма значительный интерес.

IV крайним юго-восточным маршрутом установлено, что расширение полосы основных пород продолжается и далее к юго-востоку. Ширина полосы на участке этого маршрута также около 6 км. Максимум Z_a — 3600 γ , но магнитное поле ме-

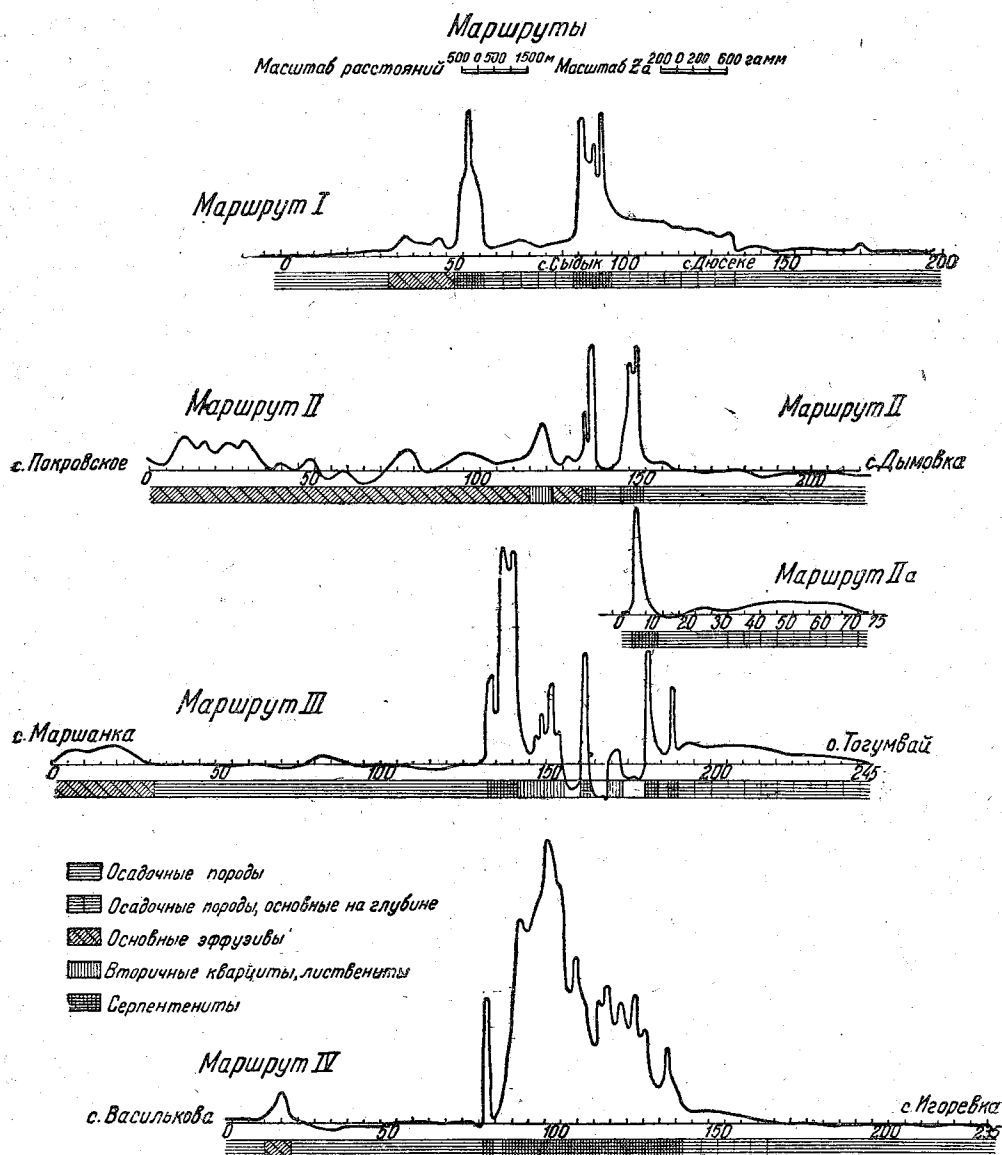


Рис. 7. Кривые Z_a .

нее сложно, чем на участке маршрута III, более равномерно повышенное, — магнитометрия отмечает один сплошной массив основных пород.

В общем маршрутные магнитные наблюдения показывают, что хотя по простиранию полоса основных пород несколько раз суживается и затем вновь расширяется, но нигде она не прерывается совершенно. Примерно в 30 км еще далее к юго-востоку, в направлении простирания Причарской полосы основных пород, при Гене-

ральной магнитной съемке в 1936 г. М. Н. Королевым отмечены аномальные напряжения магнитного поля. Таким образом полоса, имеющая местами ширину менее 1 км, прослежена по простиранию магнитной съемкой уже на 90 км. Вполне вероятным представляется предположение о том, что Причарская полоса протягивается не только на десятки, но и на 200—300 км.

В районе, где в 1936 г. производились маршрутные магнитные наблюдения, еще в 1931 г. была проведена геологическая съемка. С данными этой геологической съемки данные магнитометрии местами значительно расходятся. Так, в районе маршрута IV на геологической карте, составленной по материалам работ 1931 г. [1], основные породы не указаны. Так как с геолого-съёмочными работами 1936 г. данные магнитной съемки хорошо согласуются, можно считать, что указанное несоответствие объясняется неточностью съемки 1931 г.

В связи с этим следует подчеркнуть одну особенность соотношения между геологической и магнитной съемкой в Причарском районе. Обнаженность в пределах большей части района довольно хорошая; при этом коренные выходы приурочиваются либо к вершинам, либо к подножиям возвышенностей. В результате избирательного характера эрозионных процессов гряды сопок слагаются обычно осадочными породами, — в то время как серпентиниты, легче поддающиеся разрушению, оказываются приуроченными к долинам, лишенным хороших обнажений. Поэтому, несмотря на общую хорошую обнаженность в районе, серпентиниты при геологической съемке могут быть пропущены; геолог же, идущий по следам магнитной съемки, находит на участках резко аномального магнитного напряжения в долине элювий серпентинита, подтверждающий магнитные данные.

Расходятся с данными геологической съемки 1931 г. материалы магнитных наблюдений также в отношении участка северо-восточной части маршрутов II и III. В этом районе по данным магнитометрии распространены только осадочные породы; на геологической карте же по данным съемки 1931 г. показаны вторичные кварциты и ряд пятен пород ультра-основных. Геологическая съемка 1936 г. подтверждает и на этом участке правильность магнитных данных.

§ 7. Вопросы общей геологии

Выше уже отмечалась выдержанность геологического разреза на ряде участков района в направлении простирания пород. Схематическая геологическая карта, составленная по данным магнитометрии, дает также основание для установления некоторой закономерности в геологическом строении всего участка к северо-востоку от магистрали магнитной съемки.

На участке к юго-востоку от профиля 0—500, северо-восточнее магистрали, магнитная съемка отмечает две полосы основных пород, разделенные полосой пород осадочных. Юго-западная из этих полос без перерывов прослеживается на всех профилях, вплоть до юго-восточного края площади съемки. Северо-восточная полоса протягивается магнитометрией до профилей VI и VIII; на участке IX—X профилей она исчезает, но уже на профилях XI и XII снова отмечается, опять-таки будучи отделена от более значительной юго-западной полосы участком пород осадочных. На участке XIV—XV профилей полосы основных пород сливаются в одну. Начиная с XVI профиля, снова отмечаются две полосы серпентинита, разделенные на XVI—XVII профилях участком вторичных кварцитов (или лиственитов), а на XVIII и следующих профилях — осадочными породами. В крайней юго-восточной части площади съемки эти полосы серпентинита опять сливаются в одну полосу.

Таким образом основная особенность геологического строения северо-восточной части площади съемки оказывается неизменной на протяжении 20 км — почти на всем этом расстоянии отмечаются две отдельные полосы основных пород. Северо-восточная из этих двух полос местами суживается до 300—500 м, даже совсем выклинивается, но затем вновь отмечается, отдельно от второй, юго-западной полосы. Простираение пород различно в северо-западной и юго-восточной частях площади съемки, но на каждом отдельном участке аналогично для обеих полос.

Эта выдержанность геологического строения по простирацию является по данным магнитной съемки основной особенностью Причарского района. Вся Причарская полоса основных пород состоит из отдельных полос основных пород и пород осадочных, иногда весьма узких, но почти всегда по простирацию прослеживающихся на значительное расстояние. При этом азимут простираания отдельных полос совпадает, как правило, с азимутом простираания всей полосы на соответствующем участке площади съемки, а также близок к азимуту простираания средне-палеозойских осадочных пород за пределами Причарской полосы.

Второй особенностью магнитного поля района является наличие резких минимумов над полосами осадочных пород, встречающимися среди пород основных. Эта резкость минимумов указывает на то, что осадочные породы, выявляемые в виде таких полос на дневной поверхности, продолжают также и на значительную глубину. В противном случае Z над ними только несколько уменьшалось бы, но не достигало таких пониженных значений, как это в действительности наблюдается.

Рассмотренные особенности магнитного поля дают возможность сделать вывод о соотношении основных пород Причарской полосы с среднепалеозойскими породами осадочной толщи. Основные породы прорывают средний палеозой в виде так называемых „межпластовых интрузий“ [3]; полосы же осадочных пород среди основных являются остатками толщи, прорванной интрузией, а не остатками размытого покрова осадочных пород.

Указанное заключение приводит к выводу также и о возрасте интрузии. Поскольку она прорывает средне-палеозойские осадочные породы, ее следует относить к варисийской складчатости. До последнего времени Причарская интрузия основных пород, по аналогии с другими основными интрузиями Казахстана, относилась к складчатости каледонской.

Третьей особенностью магнитного поля является резкость изменения Z над контактами основных пород с породами осадочными, особенно в лежащем боку полосы основных пород. Эта резкость изменения Z над контактом указывает на то, что осадочные породы в контакте с основными не подверглись изменению (если не считать перекристаллизации их, не отражающейся на магнитных данных). Интересно при этом отметить, что понижение Z одинаково резко как на участках, где основные породы граничат с кремнистыми сланцами, так и на участках, где они сменяются известняками, породами, обычно более других изменяющимися в приконтактной зоне. Так, например на профиле VIII над контактом серпентинитов с известняками (в 300—400 м к северо-востоку от магистрали) Z уменьшается на 2400 γ на протяжении 200 м.

Одинаково отчетливо отмечается как контакт осадочных пород с серпентинитами, так и их граница со вторичными кварцитами и лиственитами. В то же время, как уже отмечалось, от магнитного поля, соответствующего серпентинитам, к магнитному полю вторичных кварцитов наблюдается постепенный переход. Все это дает материал для суждения о генезисе вторичных кварцитов. Резкость контакта вторичных кварцитов с осадочными породами и постепенный переход от кварцитов к серпентинитам не согласуются с предположением о том, что вторичные кварциты — контакт-метасоматические породы — произошли путем преобразования осадочных пород, вмещающих интрузию пород основных.

Данные магнитной съемки подтверждают предположение А. Г. Гокоева о том, что образование вторичных кварцитов и лиственитов — результат метаморфизации ультра-основных пород, окварцевания периферических частей основных пород в результате воздействия постмагматических гидротермальных вод.

Кроме указанных особенностей магнитного поля, характеризующих основные черты геологического строения Причарского района, — рассмотрение данных магнитной съемки дает и некоторые другие материалы об условиях залегания пород в пределах отдельных участков района. В качестве примера рассмотрим магнитные данные для северо-восточной части участка площадной съемки — района XXII—XXVI профилей.

Ранее указывалось, что над юго-западным контактом Причарской полосы основ-

ных пород с осадочными породами спад Z резче, чем над контактом северо-восточным. Это остается справедливым и для большей части полос основных пород, отмечаемых внутри общей полосы, — соответствуя устанавливаемому и геологической съемкой падению всех этих полос на северо-восток. Исключение представляет небольшая полоса основных пород, выявляемая магнитной съемкой в северо-восточной части профилей XXII, XXIV, XXV и XXVI. Основные породы этой полосы, судя по характеру кривой Z_a , падают не на северо-восток, а на юго-запад. К юго-западу от этой полосы основных пород, на профилях XXII, XXV и XXVI магнитное поле спокойное, но несколько повышенное, соответствующее, вероятно, осадочным породам на поверхности и основным породам на значительной глубине. Отсюда, весь участок между XXII и XXVI профилями можно представить в виде синклинала: основные породы слагают ядро этого синклинала, выходят на дневную поверхность в крыльях его; в юго-западном крыле — целый ряд полос, в северо-восточном — одна небольшая.

Аналогичным образом можно использовать данные магнитной съемки для построения геологических разрезов и других участков района.

Остается отметить, что, несмотря на общую выдержанность геологического строения по направлению простирания пород, имеются все же некоторые участки, где эта выдержанность нарушается. Уже указывалось, например, что между юго-западными частями VI и VIII профилей линия контакта основных пород с осадочными резко изгибается. В пределах полосы основных пород некоторые соседние профили магнитной съемки также выявляют значительное изменение геологического строения на небольшом расстоянии. Можно предполагать наличие на этих участках тектонических нарушений как северо-западного, так и перпендикулярного ему северо-восточного простирания.

§ 8. Наблюдения на участках рудных тел

Детальные наблюдения, с расстоянием между пунктами до 4 м, проведенные на участках Суук-Булакского, Букорского I, Чолобайского I и Чолобайского II, хромитовых рудных тел подтверждают устанавливавшуюся и на других месторождениях Союза невозможность непосредственных поисков хромита магнитометрией. На фоне резко изменяющегося магнитного поля, соответствующего серпентинитам, не отмечается каких-либо изменений, вызванных самими рудными телами. Проведенные работы показывают зато, как уже указано выше, что магнитометрия может быть использована для получения поисковых признаков на хромит.

Результаты магнитной съемки в районе Суук-Булакского рудного тела показаны на прилагаемой карте изолиний Z_a этого участка (рис. 8). На карте показаны 16 профилей детальных наблюдений (DI, DII и т. д.) и проходящие через этот участок профили общей магнитной съемки: 0—100, 0, 0 + 100 и 0 + 500. Хромитовое рудное тело расположено на профиле DIV, в 140 м от юго-западного его конца.

Наблюдениями установлено, что участку Суук-Булакского месторождения соответствует резкое понижение Z , с амплитудой колебания около 2500 γ . Изолинии 1500, 1000 и 500 γ , ограничивающие с северо-востока и севера основные породы от осадочных, резко отклоняются на этом участке к юго-востоку, а затем, обогнув полосу пониженных напряжений, принимают прежнее направление. В результате выделяется узкий минимум, замыкающийся на юго-востоке и „открытый“ на северо-западе, где основные породы сменяются осадочными. Ширина участка между изолиниями „500“ на профиле DIV около 65 м; по простиранию же минимум прослеживается на расстояние более 1000 м.

Горные работы, проводившиеся в районе месторождения, показывают, что рассмотренное понижение Z соответствует участку сильно разрушенного серпентинита, местами превращенного в измененную глинистую карбонатно-серпентинитовую породу. Эта карбонатно-серпентинитовая порода устанавливается всеми канавами, проведенными около самого рудного тела, а также и некоторыми из канав и шурфов,

проведенных на участке магнитного минимума, северо-западнее и юго-восточнее рудного тела. Канавы же, проведенными по сторонам от магнитного минимума, установлены неизменные, неразрушенные серпентиниты.

Минимум Z участка Суук-Булакского месторождения сходен с теми минимумами, которыми в Причарском районе отмечаются полосы осадочных пород среди пород основных. Но в то время как полосам кремнистых сланцев и иногда известняков,

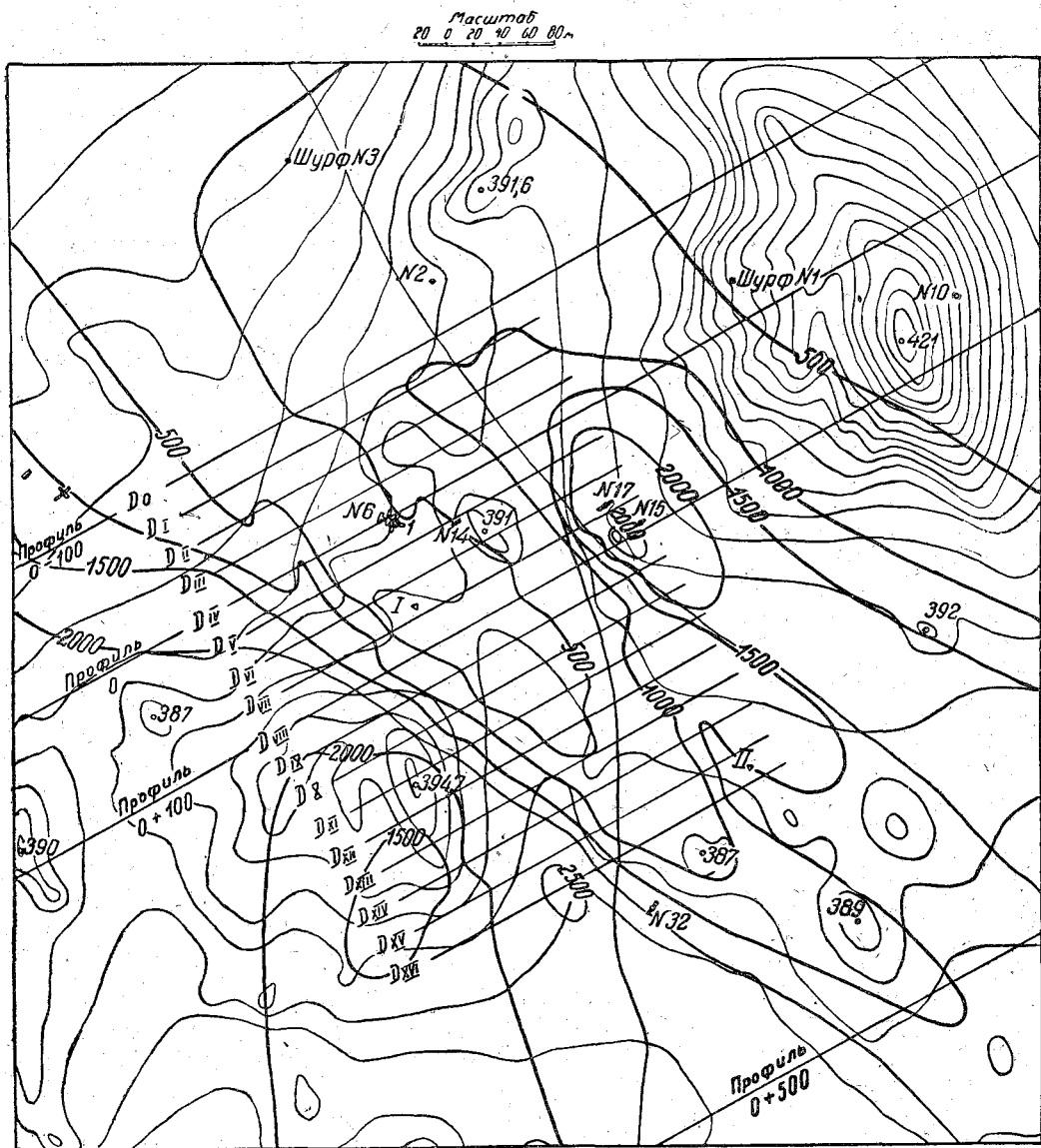


Рис. 8. Карта изолиний Z_a участка Суук-Булакского месторождения хромита.
Изолинии проведены через 500 γ; сечение горизонталей через 2 м.

расположенных среди серпентинитов, соответствуют повышения рельефа, сопки, — понижение Z на Суук-Булакском участке находится в пределах сглаженной долины.

Второй особенностью Суук-Булакского минимума является то, что на фоне общего понижения имеются повышения и понижения второго порядка. Над осадочными же породами обычно наблюдаются плавные понижения Z . Некоторыми из шурфов, проведенных в районе магнитного минимума, наряду с разрушенными сер-

пентинитами обнаружены участки плотных, неизмененных серпентинитов; таким участкам и соответствуют максимумы Z_a на фоне общего минимума.

Магнитные съемки на других хромитовых месторождениях Союза показывают, что хромитовые рудные тела часто бывают приурочены к минимумам магнитного поля, отмечающим участки сильно разрушенного серпентинита. Участки же сильно разрушенного серпентинита соответствуют нередко тектоническим трещинам в серпентинитах.

Так например, на уральском месторождении хромита „Верблюжьей Горы“ (Полтавский змеевиковый массив) большая часть рудных тел приурочена к трещинам в серпентинитовом (змеевиковом) массиве. Образование этих рудных тел геолог Л. И. Панкуль считает результатом процессов концентрации хрома к концу магматического периода, — ликвации, внедрения остаточного рудного расплава в трещины в застывшей уже внешней оболочке массива. Образование трещин связано с тектоническим воздействием на полужастывший массив; поэтому приурочены они, главным образом, к участку дугообразного изогнутия юго-восточной части массива.

В районе, прилегающем с северо-запада к Суук-Булакскому месторождению хромита, также устанавливается резкий изгиб линии контакта серпентинитов с осадочными породами. Таким образом намечается некоторая генетическая аналогия Суук-Булакского месторождения с хромитовыми месторождениями Верблюжьей Горы.

Во всяком случае, магнитные данные показывают, что вдоль полосы магнитного минимума участка Суук-Булакского месторождения целесообразно в дальнейшем продолжить поисково-разведочные работы. Следует вообще особое внимание при поисках обращать на участки минимумов магнитного поля, не соответствующие полосам осадочных пород.

Нельзя, однако, считать, что хромитовые рудные тела следует искать только на участках таких магнитных минимумов. Наблюдениями на участке Чолобайского месторождения аналогичного минимума не выявлено. Магнитометрией устанавливается зато, что два рудных тела этого месторождения, расположенные на расстоянии в 650 м одно от другого, приурочены к одному и тому же участку геологического разреза — к северо-восточному контакту небольшой полосы серпентинита (шириной порядка 150 м) с осадочными породами. Северо-восточнее этой полосы серпентинита осадочные породы распространяются на значительное расстояние, — указанный контакт является в этом районе границей всей Причарской полосы. Юго-западнее, вслед за небольшой полоской осадочных пород вновь появляются породы основные: серпентиниты и вторичные кварциты.

Приуроченность обоих рудных тел к определенному месту геологического разреза указывает на перспективность для поисков хромита участка между ними. Здесь поисковым признаком оказывается уже иная особенность магнитного поля.

Магнитными наблюдениями по профилю вкост Букурского 1 месторождения, расположенного среди плотных серпентинитов, не установлено каких-либо особенностей магнитного поля, характеризующих участок месторождения. Следует отметить, что и на упоминавшемся уральском месторождении „Верблюжьей Горы“ наряду с рудными телами, приуроченными к тектоническим трещинам в серпентинитах, установлен ряд случайно расположенных рудных тел. Такие рудные тела могут образовываться в результате гравитационной дифференциации магмы, в результате миграции хрома при процессах серпентинизации и т. д. Однако наиболее крупные рудные тела на некоторых месторождениях, в частности на месторождении „Верблюжьей Горы“, приурочены к определенным местам геологического разреза.

В качестве одного из признаков рудоносности тех или иных участков Причарской полосы основных пород может быть использована также степень сложности магнитного поля. К числу наиболее сложных по характеру магнитного поля участков относятся район маршрута III, где обнаружено несколько рудных тел; район профилей XXV—XXVI, где найдено два рудных тела; район между юго-западными частями XIV—XXII профилей, где обнаружены два рудных тела и ряд участков элювиального и делювиального хромита. Сложное магнитное поле с большим числом резких максимумов и минимумов соответствует участкам сложного геологиче-

ского строения с частой перемежаемостью пород и тектонически сильно нарушенным. Повидимому такие участки были наиболее благоприятны для концентрации хромита.

§ 9. Заключение

На основании всего вышеизложенного результаты постановки магнитной съемки в районе Причарской полосы основных пород следует признать вполне положительными. Магнитометрия с успехом решает основную задачу геологического картирования — определение границ распространения различных пород. Местами подтверждая, местами дополняя и уточняя данные геологической съемки, магнитные наблюдения дают подробнейший материал о геологическом строении отдельных участков района. Одновременно магнитометрия дает указания также и по вопросам тектоники района, — условий залегания отдельных пород и структурных соотношений между ними, — и даже по вопросам определения генезиса и возраста пород. Наконец, хотя непосредственные поиски хромитовых рудных тел магнитной съемкой невозможны, — данные магнитометрии могут быть использованы для определения направления поисково-разведочных работ, степени перспективной рудоносности того или иного участка.

С другой стороны, поисково-разведочными работами 1936 г. устанавливается значительный интерес хромитоносности Причарской полосы (число известных рудных тел увеличено с 2 в 1935 г. до 20 в 1936 г. — в десять раз). Целесообразно, отсюда, продолжение магнитометрических работ в районе.

Правильная схема геолого-разведочного комплекса требует также, чтобы магнитометрией не было ограничено применение геофизики в Причарском районе. В результате работ, проведенных на ряде хромитовых месторождений Урала, установлена возможность отчетливого выделения хромитовых рудных тел с помощью гравиметрического метода разведки. Можно предполагать, что применение гравиметрического метода окажется оправданным и в Причарском районе. Ввиду дороговизны гравиметрической съемки и необходимости для поисков рудных тел весьма детальных гравиметрических наблюдений, этот метод должен ставиться только на очень небольших, наиболее перспективных участках. Для выделения таких участков должна быть использована детальная магнитная съемка.

Успешность постановки магнитной съемки в Причарском районе дает основание обратить внимание также и на то, что в Казахстане, несмотря на широкое распространение здесь изверженных пород и исключительную сложность геологического строения, было лишь очень немного работ по магнитной съемке с задачами геологического картирования. Это игнорирование магнитометрии при геологическом картировании Казахстана является совершенно неоправданным.

Недооценка и непонимание возможностей магнитной съемки в геологическом картировании присущи многим геолого-разведочным организациям. До сих пор еще распространено местами представление о магнитной съемке, как о методе, оправдывающемся только при изучении железорудных месторождений. Между тем многие магнитометрические работы, проводившиеся в разных районах Союза, — в первую очередь работы самых последних лет, — наглядно иллюстрируют значение магнитного метода для геологического картирования, особенно в областях распространения изверженных и метаморфических пород. В качестве примера можно указать, кроме рассмотренной в настоящей статье магнитной съемки в Причарском районе, также и на некоторые другие работы Института земного магнетизма. Так, магнитной съемкой, проведенной в 1935 г. в юго-западной части Кольского полуострова, в районе р. Ены очень редкой сетью наблюдений был отчетливо оконтурен сиенитовый массив, расположенный среди гранитов, и установлена возможность дифференциации пород внутри самого массива. В 1935 и 1936 гг. в Калевальском районе Карельской АССР магнитными партиями ИЗМ успешно производилось определение контакта амфиболитов и амфиболо-биотитовых сланцев с гранитами. Весьма успешны были многие работы по геологическому картированию магнитной съемкой, проводившиеся уральскими организациями [5] и др.

Все эти работы показывают, что применение магнитометрии всегда возможно для определения контактов изверженных пород с осадочными и для прослеживания массивов изверженных пород под наносами. Вполне возможно также определение магнитной съемкой контактов между различными изверженными породами: разделение основных изверженных пород от пород кислых, ультра-основных от основных и кислых, интрузивных от эффузивных и т. д. При этом, как показывает магнитная съемка в Причарском районе, применение магнитометрии оказывается целесообразным не только в районах, где нет или мало коренных выходов, но нередко и в районах хорошей обнаженности пород.

Вследствие портативности и простоты магнитометрической аппаратуры и невысокой стоимости магнитометрических работ, постановка магнитных наблюдений должна стать обязательной в большей части случаев проведения геологической съемки в районах распространения изверженных и метаморфических пород; различным масштабам геологической съемки должна соответствовать и различная степень детальности наблюдений магнитных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Елисеев, Геологический очерк Калбы. Сборник „Большой Алтай“, т. II, изд. Академии наук СССР. 1936 г.
2. А. Г. Гокоев, Предварительные отчеты Чарской геолого-съемочной партии за 1934, 1935 и 1936 гг. Фонд Казгеолтреста.
3. А. Г. Гокоев, Месторождения хромита и никеля в серпентинитах Колбинского хребта. Сборник материалов по геологии и полезным ископаемым Казахстана, № 1, изд. Казгеолтреста. 1936 г.
4. Б. А. Андреев, Применение геофизических методов при поисках и разведке хромитовых месторождений. Труды ЦНИГРИ, вып. 100. ОНТИ. 1937.
5. Д. С. Миков, Магнитометрические работы на Урале. Информационный сборник по земному магнетизму и атмосферному электричеству, № 3, изд. Гидрометеониздата. 1937 г.

GEOLOGICAL MAPPING BY MEANS OF MAGNETIC SURVEY IN THE ZONE OF PRINCIPAL ROCKS NEAR THE CHAR TRIVER

By *O. J. Solodukho*

Summary

In this work the author gives the results of the magnetic survey carried out in 1936 by the Institute of Terrestrial Magnetism in the south-western part of the Kalba mountains in East Kazakhstan.

By means of this survey the basis problem of the geological mapping—the determination of limits of the distribution of different rocks—has been solved successfully.

The author distinguishes four types of magnetic fields corresponding to specific rocks.

The magnetic survey gives also data for the solution of some vague and vexed questions of regional geology: the conditions of bed rocks, the structural relations between them and even the genesis and age of rocks.

The direct researches of the chromite ore deposits are impossible, but the obtained data may be used for the determination of the probability of discovering ore deposits in different districts.

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В СВЯЗИ С ВОПРОСАМИ ЕЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

Проблема глубинной геологической структуры Ленинградской области, помимо большого теоретического интереса, имеет и очень важное практического значение. Особое значение эта проблема имеет для выявления и разведки месторождений соли, природных газов и нефти. Предпосылки к нахождению указанных месторождений на рассматриваемой территории были неоднократно высказаны за последние 2 года. Между тем, ввиду обширности территории и редких и сравнительно неглубоких буровых скважин, мы пока имеем очень бедный материал, необходимый для развития планомерных буровых разведок.

При таких условиях является целесообразным использовать геофизические методы и, в частности, магнитную разведку, основываясь на богатом опыте их применения при разведке нефтяных месторождений как у нас в СССР, так и за границей.

При всех обстоятельствах представляется весьма выгодным иметь данные для суждения о том, на каком пространстве можно считать аналогичными геологические условия, прослеженные буровой разведкой в данном участке.

Во многих случаях геологические структуры, благоприятствующие скоплению нефти и газов в горизонтах, сравнительно близких к дневной поверхности, дают о себе знать в виде хотя и слабых, но достаточно заметных искажений однородного геомагнитного поля.

Надо отметить, что на земной поверхности всюду почти можно встретить эти слабые искажения однородного геомагнитного поля (так называемые магнитные аномалии), и потому магнитная разведка не является прямым указателем нефтеносных (или газоносных) участков подобно участкам с магнитной железной рудой. Магнитную аномалию легко оконтурить и нанести на карту, но сказать, чем она обусловлена и с какой глубины, без данных бурения в большинстве случаев нельзя, если мы не желаем иметь дело с мало обоснованными гипотезами. Напротив того, если мы имеем на участке буровую скважину и знаем магнитные свойства пород, ветреченных этой скважиной, является весьма вероятным суждение, на основании магнитной карты данной местности, о пространственном расположении геологических условий на участках магнитометрически аналогичных с пробуренным участком.

За последние годы в разведках на нефть магнитометрия оказалась особенно выгодной для рекогносцировки „высоких структур“ (high), проявляющих магнитные свойства в той или иной степени.

Иностранная литература по этому вопросу довольно обширна. Ее обзор дан в работе Н. Н. Трубятчинского „Магниторазведка на нефть“ (1934 г.). В конце этой статьи указаны некоторые из работ, относящиеся к геологическим условиям, аналогичным условиям Ленинградской области.

С 1926 г. в США начали проводить опыты для выяснения возможности оконтуривания подземной геологической структуры помощью магнитных весов. В этих первых опытах исследовались погребенные гранитные хребты и изверженные интрузивы в расчете, что в этих условиях концентрация магнитных материалов отразится

на поверхности в виде увеличения вертикальной составляющей геомагнитного поля [1]. Однако эта теория применима лишь к тем простейшим геологическим формам интрузивов и поднятий, которые обладают отчетливыми магнитными свойствами.

В общем же случае необходимо иметь в виду, что аномалии вертикальной составляющей обуславливаются многими факторами, заставляющими свои действия друг на друга. Тут могут оказывать влияние: 1) величина и направление основного геомагнитного поля; 2) физические соотношения, порядок и магнитные свойства вмещающей поверхности и подповерхностной среды; 3) топографические воздействия, особенно при некоторой магнитности поверхностных пород.

Таким образом теория магнитных *high* не всюду приложима; будучи весьма полезной на кристаллических объектах с ясно выраженными магнитными свойствами, в массовом приложении к осадочным объектам она отчасти способствовала дискредитации метода магнитной разведки на нефть (и газы). Хотя, вообще говоря, и в этом случае имеется некоторое соотношение между магнитными аномалиями и геологической структурой, но это отношение не всегда просто и однозначно. По своей сложности оно не поддается расчетам, и в большинстве случаев интерпретация магнитных карт сводится к наложению контуров магнитных изолиний для вертикальной составляющей геомагнитного поля на структурную карту, в результате чего для разведки данного района требуется меньше структурного бурения на данную площадь, и само структурное бурение производится по данным магниторазведки с большим основанием.

Магнитная карта Ленинградской области составлялась: 1) в 1914 г. Е. А. Кучинским, 2) в 1936 г. Главной геофизической обсерваторией. По мере накопления новых магнитных наблюдений, последние принимались в расчет, и потому последняя магнитная карта (1936 г.) наиболее полная и надежная и является первым шагом к использованию результатов проведенной в 1931—1935 г. генеральной магнитной съемки СССР для геолого-разведочных целей.

Поэтому является весьма важным сопоставление деталей этой карты с данными геологии. Такое сопоставление дается ниже в настоящей статье, которая является дальнейшим развитием опыта использования магнитных карт для геологоразведочных целей.

Принимая во внимание общий характер геологии местности (подробнее об этом будет сказано ниже), следует заключить, что происхождение максимумов в Z_a в данном районе может обуславливаться: а) либо действительными высокими структурами кристаллических пород, ближе подходящих к поверхности в районах максимумов (что более вероятно), ибо на выходах кристаллических пород Z повышены; б) либо зональным обогащением коренных пород магнетитом; в) либо скоплением ледниковых отложений, имеющих заметные магнитные свойства (что менее вероятно).

Для окончательного решения этого вопроса необходимо либо ставить бурение на магнитных максимумах $+Z_a$, либо на этих максимумах ставить сейсморазведку и по ее данным решать вопрос о целесообразности разбуривания того или другого максимума.

Принимая во внимание: 1) сравнительную близость докембрийского кристаллического массива, 2) обширность районов с повышенными Z_a , 3) величину напряженности самих Z_a (особенно на выходах кристаллических пород в районе Мишиной Горы), мы должны заключать, что предположение а) в соединении с предположением б) является более обоснованным, и в таком случае, согласно общим положениям, изложенным в начале этой статьи, можно сделать определенные выводы, которые должны облегчить дальнейшие работы и указать на последовательность этих работ по разведке на соль, нефть и газы в Ленинградской области, для ускорения успеха при максимальной экономии расходов.

Еще в 1914 г. появилась статья Е. А. Кучинского,¹ в которой автор, применяя метод Рюккёра и Торпе, построил для восточной части б. Петербургской губернии карты магнитных хребтов, и на основании своих карт пришел к следующим выводам:

¹ Е. А. Кучинский. Геомагнитные хребты и долины в районе восточной части Петербургской губ. Геофизический сборник, т. I, вып. 2, издание Главной физической обсерватории.

а) к востоку от р. Волхова и по линии Стороженский Маяк—Ратилова—Посельница—Боровичи—Окуловка—Бологое—Демьянск проходит магнитный хребет, отмечаемый повышенными значениями Z ;

б) второй, параллельный первому (но более слабый), магнитный хребет проходит между 0 и 1° долготы по линии Левашево—Шлиссельбург—Тосно—Сиверская.

Бюро генеральной магнитной съемки СССР в 1934 г. провело еще более детальную (через 400 м) маршрутную рекогносцировку по маршруту Ленинград—Сестрорецк—Белоостров—Парголово—Шувалово—Лахта. Как результат этой рекогносцировки интересным представляется магнитный максимум Z_a к югу от ст. Горской (в Сестрорецком районе). Здесь наблюдается типичный high (по американской терминологии). На площади в 4 км² оконтурен максимум Z_a , отчетливо выделяющийся на обширном фоне магнитной low (долины по терминологии Кучинского).

Желательна сейсмическая разведка, которая не только проверит наши заключения, но и получит данные о глубине и наклоне предполагаемого здесь купола кристаллических пород.

Как типичные магнитные low отмечаются западный берег Лахтинского залива и северная окраина г. Сестрорецка. В этих местах возможно встретить синклинали или ложбины в кристаллическом массиве, предполагая сравнительно однообразными его магнитные свойства.

Итак, что же может дать магнитная разведка в Ленинградской области? В результате магнитной съемки того и другого типа мы получим магнитную карту с контурами high и low и можем выделить районы благоприятные для дальнейшей разведки (сейсмической или буровой).

Но если сама по себе магнитная разведка на слабых магнитных аномалиях не может увенчаться точными указаниями на глубину и наклон кристаллических внедрений в осадочные слои, то не следует ли прямо и целиком обратиться к сейсмической или гравиметрической разведке?

Для ответа на этот вопрос следует принять во внимание стоимость той и другой разведки.

Не имеет смысла, из-за дороговизны, покрывать всю площадь Ленинградской области сплошной сейсмической или гравиметрической разведкой, а достаточно это сделать на магнитных high (и на low в случае нарушенности напластований), так как, несмотря на то обстоятельство, что мы измеряем суммарное магнитное действие всех напластований и коренных пород, все же высокие структуры в данных условиях магнитометрически оконтуриваются, и магнитная разведка в значительной степени суживает и локализирует районы, подлежащие разведке более дорогими методами, при помощи которых можно дать более точную и определенную интерпретацию магнитных максимумов—high, как указателей высоких структур.

Таковы основные результаты магнитометрических исследований в Ленинградской области.

Ниже мы делаем попытку получить заключения о соотношении между выявленным характером аномалий магнитного поля и геологической структурой.

Решение этой задачи представляется делом в значительной степени трудным. Ввиду, с одной стороны, все еще малого количества магнитных наблюдений и, с другой, — наших сравнительно скудных знаний глубокой геологии исследуемого района. Необходимо также указать и на затруднение принципиального характера, заключающееся в том, что интерпретация всякой геофизической съемки представляет задачу, которая теоретически допускает бесчисленное множество решений. Однако практически число решений может быть значительно уменьшено, потому что многие из возможных решений в данной конкретной геологической обстановке отпадают ввиду их фантастичности, и даже, в особо благоприятном случае, остается только одно решение, как наиболее вероятное. Несмотря на вышеуказанные трудности, мы все же полагаем, что на основании имеющихся геологических фактов и общих геотектонических соображений может быть дана, правда пока еще только в общих схематических чертах, интерпретация результатов данных магнитометрических исследований.

Основными вопросами, подлежащими прежде всего разрешению при интерпретации, являются следующие:

а) какие породы из комплекса, развитого в данном районе, создают наблюдаемые аномалии геомагнитного поля;

б) чем обуславливаются наблюдаемые вариации напряженности аномалий — различием ли глубины залегания пород в разных точках площади или изменчивостью магнитной восприимчивости их, т. е. изменчивостью содержания магнетита в них.

Чтобы ответить на эти вопросы, необходимо рассмотреть основные особенности геологического состава и строения исследованного района, которые мы и даем ниже.

Докембрий (архей, протерозой) нигде, за исключением района с. Мишиной Горы (25 км к ЮВ от г. Гдова), в южной части Ленинградской области, на дневную поверхность не выходит. О характере его можно судить, главным образом, по образцам немногих глубоких буровых скважин, проведенных в Ленинграде и его окрестностях и в Эстонии, и с большей или меньшей вероятностью предугадывать по аналогии с соседней Финляндией. В образцах из упомянутых скважин докембрий, согласно данным Н. Ф. Погребова [10] и Н. Scipin'a [13], представлен гнейсом, гранитом-раппакиви, пегматитом. В южной и средней Финляндии, согласно геологической карте Фенно-Скандии Седергольма, приведенной в работе А. Д. Архангельского [4], и пояснений последнего, мы встречаем целую серию изверженных и метаморфических пород, различных по времени эпох докембрия. Главнейшими типами пород докембрия являются: граниты, гнейсо-граниты и гранито-гнейсы, как породы, имеющие преимущественное распространение, и переходы их в диориты и габбро, а также метаандезиты, metabазальты и др., затем филлиты, слюдяные, роговообманковые и кварцевые сланцы, мраморы и др.

Кембрий (нижний) представлен сверху плотными жирными глинами, общей мощностью несколько превышающий 200 м, внизу — песчаниками, переслаивающимися с прослоями глин, достигающими 100 м мощности и залегающими непосредственно на кристаллических породах докембрийского возраста.

Силур (нижний) представлен, главным образом, известняками, местами доломитизированными и содержащими слои горючих сланцев (кукерсита). В низах силурийской толщи залегает диктионемовый сланец, подстилающийся оболочными песками и песчаниками.

Согласно последним данным (Б. П. Асаткин [14]), в Гдовском сланцевом руднике в толще кукерсита обнаружены вертикально стоящие сульфидные полиметаллические (железо, свинец, цинк, золото и др.) жилы гидротермального происхождения. Этот факт дает основание предполагать наличие сравнительно близко расположенной кислой интрузии. Общая мощность нижнего силура варьирует в пределах 10—180 м.

Девон (средний и верхний). Отложения среднего девона залегают на размытой толще нижнего силура и представлены доломитовыми мергелями с прослоями глин (мощностью до 30 м) и покрывающей их толщей пород (около 300 м), главной составной частью которых являются красные пески и песчаники.

Верхний отдел девона складывается из двух толщ: нижней — известняково-глинистой и верхней — красноцветной песчанистой.

Нижняя толща, отличаясь изменчивым, пестрым характером, наибольшее развитие имеет на юго-западе Ленинградской области, тогда как к северо-востоку замещается глинами и еще дальше — песками. Мощность ее чрезвычайно изменчива и достигает 80 м.

Верхняя толща, состоящая преимущественно из песчаников, имеет мощность до 150 м.

Интересным фактом является, как приводит Б. П. Асаткин [2], ссылающийся на А. Orik и N. Tham, обнаружение диабазов в буровой скважине близ западного берега Чудского озера (Эстония) в красноцветной толще среднего девона.

Карбон (нижний, средний и верхний). Нижний карбон представлен внизу (продуктивная толща) песчано-глинистыми отложениями, содержащими полезные ископаемые, как боксит, каменный уголь, огнеупорные глины, и доломитами, сменяющимися вверх известняками (продуктосовая толща). Мощность нижнего карбона

60—90 м. Средний карбон представлен известняками: мощность около 50 м. Верхний карбон, выраженный известняками и доломитами, достигает мощности до 50 м.

Четвертичные отложения (ледниковые). Комплекс ледниковых отложений представлен валунными суглинками, глинами, песками, гравием и галечниками. Эти отложения варьирующей мощности образуют плащ, которым весь наш район покрыт почти без перерывов.

С точки зрения магнито-восприимчивых масс, имеют значения те типы ледниковых отложений, которые содержат в большом количестве обломочный материал изверженных пород, а именно — морена. Особенное значение в этом отношении имеют валуны, как наиболее крупный обломочный материал морены. В тех местах, где морена размывается и освобождается от песчано-глинистого материала, валуны образуют нагромождения значительные по площади (в среднем несколько квадратных километров) и по мощности (до нескольких метров). Валуны представлены, главным образом, гранитами (раппакиви) и гранито-гнейсами и реже диабазами и известняками. В местах мощных скоплений валунов кристаллических пород можно было бы ожидать появления аномалий элементов магнитного поля.

Основные черты тектонического строения южной части Ленинградской области представляются в следующем виде.

Фундамент докембрийских кристаллических пород рассматриваемого района представляет собою продолжение Балтийского щита. Этот фундамент принято рассматривать как подземный склон Балтийского щита, имеющий общее пологое падение к Ю. Толща палеозоя своими нижними горизонтами (кембрий) налегает на размытую поверхность кристаллического фундамента. Не касаясь отдельных особенностей, деталей, имеющих, правда, очень важное значение для понимания глубокой структуры (на некоторых мы остановимся несколько ниже), ограничимся пока указанием, что палеозойские породы залегают почти горизонтально с уклоном к Ю и ЮВ, измеряемыми долями градуса [10, 15]. Вследствие такого характера залегания при движении с С на Ю древние породы сменяются все более и более молодыми, и в крайнем юго-восточном углу площади магнитной съемки (район Валдай—Боровичи—Бологое) мы вступаем в область, занятую отложениями карбона, и должны здесь предполагать глубину залегания докембрийских пород (порядка 1000 м), исходя из взятых (грубо) мощностей палеозойских толщ.

На основе приведенной характеристики геологического строения нашего района, попробуем дать ответ на поставленные выше вопросы.

Рассматривая весь комплекс развитых в нашем районе пород, можно с достаточной уверенностью прийти к тому выводу, что осадочная толща, как таковая, начиная с кембрия и кончая карбоном, содержит породы, которые не могут создавать аномалии геомагнитного поля наблюдаемой напряженности.

Кристаллические же породы, по своим магнитным свойствам, подобные аномалии обуславливать могут, и именно ими и создается та картина геомагнитного поля, которая представлена на карте Z_a . Какие же это кристаллические породы? Из вышеизложенного вытекает, что кристаллические породы, встречаемые в рассматриваемом районе, проявляются в следующем виде: 1) валуны в ледниковых отложениях; 2) внедрения в осадочной толще нижнего палеозоя, примером которых могут служить упомянутые выше диабазы в девоне Эстонии и 3) докембрийский фундамент, сложенный в основном изверженными породами.

Не считая возможным полностью отбросить валунные скопления как причину наблюдаемых аномалий, мы сохраняем, однако, за ними весьма скромную роль в этом деле, допуская, что только в некоторых точках магнитных наблюдений влияние их могло сказаться, но что картина аномалий, взятая в целом, отражает поведение глубоко залегающих кристаллических масс. В пользу такого представления было уже сказано выше, здесь же мы можем привести несколько дополнительных соображений. Действительно, если мы возьмем некоторые известные нам и значительные по размерам валунные поля и посмотрим на значения вертикальной составляющей в пунктах магнитных наблюдений, расположенных или в пределах этих полей, или вблизи их, то убеждаемся в очень небольших значениях вертикальной составляющей,

нередко даже отрицательных. Таковы валунные поля в районе ст. Веймарн (на карте — лит. А), к югу от оз. Самро (лит. В), у д. Слудицы (лит. Д). Возможно, что в местах очень мощных валунных накоплений, как например Валдайской возвышенности, влияние их на искажение магнитного поля сказалось, но величина этого влияния могла бы быть определена только частой сетью пунктов магнитных наблюдений, так как скопления валунов далеко не занимают всего пространства сплошь, и поэтому относить наблюдаемые в этом районе сравнительно сильные аномалии, определенные по очень редким точкам наблюдений, к таким, которые вызываются валунами, было бы неправильно, тем более, что аномалии здесь создают картину известной закономерности на большой площади, никак не объяснимую присутствием валунного материала, располагающегося далеко не в таком порядке. Что касается до интрузий, или излияний магмы в осадочной толще нижнего палеозоя, то мы не можем с достаточной определенностью оценить значение этого фактора в создании аномалий магнитного поля данной территории. Непосредственно установленных проявлений вулканической деятельности в нижнем палеозое имеется очень мало (диабазы Эстонии и проблематическая интрузия в Гдовском районе), но самый факт их наличия имеет важное принципиальное значение, указывая на возможность более значительного распространения этих явлений. Однако нельзя переоценивать этого фактора в создании наблюдаемого геомагнитного поля, так как это не соответствовало бы геотектоническому положению данной территории. Действительно, данный район является окраиной каледонской зоны складчатости, и поэтому нельзя ожидать сколь-нибудь значительного развития в пределах его вулканической деятельности, приуроченной к этой эпохе складчатости. То же положение остается и для более поздних фаз складчатости.

Итак, мы приходим к убеждению, что искажение нормального геомагнитного поля, главным образом, обуславливается кристаллическими породами докембрийского фундамента.

Теперь мы должны ответить на вопрос, какими свойствами пород докембрийского ложа обуславливаются вариации напряженности аномалий. Играет ли здесь роль исключительно изменение состава этих пород, т. е. колебание содержания в них магнетита, или при однообразном содержании последнего на сцену выступает другой фактор — изменчивость глубины залегания поверхности докембрийского фундамента. Дать вполне определенный ответ на этот вопрос невозможно за отсутствием прямых на то данных, но попытаться произвести ориентировочную оценку вероятности каждого из этих факторов на основании имеющихся геологических данных можно.

Как известно, магнитная восприимчивость основных изверженных пород в среднем в несколько раз выше таковой кислых пород, и, следовательно, аномалии магнитного поля, создаваемые первыми породами, должны быть интенсивнее тех, которые создаются вторыми. Выше было указано, что о составе пород кристаллического поля нашего района мы можем высказать только весьма проблематические предположения, которые сводятся к следующему. По аналогии с соседней территорией Финляндии и северной пограничной зоной нашего района мы должны ожидать преимущественно развития кислых кристаллических пород. Однако мы должны сделать оговорку: 1) столь далеко проводимая экстраполяция является рискованной и 2) в той же Финляндии местами имеют развитие и основные породы, причем магнитное поле по Финляндии более возмущенно, чем по району нашей карты.

Таким образом наше заключение должно выразиться в том, что докембрийский фундамент нашего района складывается из кислыми и основными породами, причем первые, повидимому, имеют большее развитие, чем вторые.

Рассмотрение магнитной карты Z_a выявляет, между прочим, следующие особенности. Мы замечаем нередко довольно резкое колебание вертикальной составляющей, порядка нескольких сот и до 1000 γ. Затем наблюдается такой факт, что на некоторых выходах на дневную поверхность гнейсов отмечаются сравнительно слабые аномалии, тогда как в других местах заведомо более глубокого их залегания аномалии во всяком случае не ниже. Эти факты дают указание, что, повидимому, изменение состава докембрийских пород, т. е. колебание в содержании магнетита

(смена кислых пород основными), имеет место, и этим фактором могут обуславливаться те или иные аномалии в нашем районе.

Попробуем рассмотреть вероятность другого фактора, а именно — изменчивость глубины залегания кристаллического ложа.

Какими геологическими данными располагаем мы для суждения о характере рельефа кристаллического фундамента и о возможных глубоких структурах в нем и покрывающей его толще палеозоя?

Приведем сначала относящиеся к этому вопросу фактические данные, как наиболее достоверный материал, а затем остановимся на более или менее вероятных допущениях, вытекающих из сопоставления ряда геологических данных.

Глубокие буровые скважины, расположенные вдоль южного побережья Финского залива в Ревеле, Ассерине, Ленинграде и его окрестностях и в районе Сясь-строга, показали различную глубину залегания пород кристаллического ложа. Так, в Ревеле гнейсы были достигнуты на глубине 111 м ниже ур. м. (Н. Ф. Погребов [10]), на цементном заводе в Ассерине (Эстония) — 122,76 м (Scúpin [13]), в Ленинграде 14 скважин достигли гранито-гнейсов на глубине от 188,7 до 216 м, в Сестрорецке 2 скважины — на глубине 145 и 165 м и в Сясь-строге скважина глубиной 332 м не вошла в докембрий. Из этих данных можно сделать вывод об общем погружении кристаллических пород вдоль Финского залива в направлении с С на Ю и о значительной неровности их поверхности.

Сильными тектоническими нарушениями в Гдовском районе, в окрестностях с. Мишиной Горы, установленными в последние годы Б. П. Асаткиным [2], гнейсы подняты и выведены на дневную поверхность, Кембро-силурийские отложения здесь претерпели сложную дислокацию, выражающуюся в виде антиклинального поднятия направления СВ—ЮВ, осложненного сбросами и надвигами широтного и меридионального или приближающегося к ним простирания. Верхнедевонские отложения в том же районе подверглись более слабой складчатости, сопровождающейся сбросами и надвигами. Простирание дислокаций СВ—ЮЗ и перпендикулярно к нему СЗ—ЮВ. Таким образом дислокация, которой затронут кембро-силур, относится к каледонской фазе складчатости, тогда как дислокация, захватившая верхний девон, относится к более поздней, возможно варисцийской фазе.

Дислоцированность силурийских отложений в районе ст. Серебрянки (ж.-д. линия Ленинград—Псков), установленная Б. П. Асаткиным [2], имеет то же направление, что в окрестностях с. Мишиной Горы, и позволяет названному автору предполагать площадное распространение каледонской складчатости.

Известные уже около 50 лет выходы дислоцированного кембро-силура на р. Ловати, близ г. Холма, в последние годы исследовались И. В. Даниловским [8], которым устанавливается существование меридионального, так называемого, Полистовско-Ловатского вала, сформировавшегося в послеврхнедевонское время.

Согласно Б. П. Асаткину [2], в двух скважинах, проведенных на ст. Ново-Лисино и Кастенская (по ж. д. Ленинград—Новгород) непосредственно под толщей среднего девона залегает кембрийская синяя глина на высоте около 20—25 м, выше нормально ей предположенной. Нижний силур отсутствует. Можно полагать, что эти данные указывают на подъем кембрия, возможно и силура, впоследствии размытого, в промежуток времени от нижнего силура до среднего девона. Таким образом можно предполагать существование тектонического нарушения меридионального направления, приуроченного также к каледонскому орогенезу.

В пользу предположения о существовании тектонического поднятия кембро-силура в этом районе говорит также фациальное изменение древнейших слоев среднего девона, а именно его наровских слоев, в направлении с З на В, выражающееся в постепенном замещении мергелей глинами и песчаниками, что указывает на приближение береговой линии. Это тектоническое поднятие (Лисино—Кастенская) может, таким образом, рассматриваться как естественная преграда для наровского бассейна, его берегом с восточной стороны (Асаткин [5]).

Согласно Н. Н. Соколову [11], наблюдается „колебание высот поверхности девона над толщей карбона — от 150 до 170 м у д. Кунянки (близ оз. Селигер) до

50—100 м в Метинской впадине“, что дает названному автору основание предполагать движение эпейрогенического характера, относящееся по времени после отложения продуктивной свиты нижнего карбона.

Можно привести также факты тектонических движений значительно более поздних, относящихся к ледниковому и послеледниковому времени. Как пример этих нарушений, согласно Scupin'a [13], необходимо рассматривать сброс вдоль Финского побережья в Эстонии, в районе о. Кокшера, опустивший кембро-силурийские отложения не менее чем на 125 м. Некоторыми авторами рисуется серия крупных сбросов вдоль берегов Финского залива, Ладожского и Онежского озер. А. Д. Архангельский [4] хотя и подвергает сомнению наличие здесь сбросов, но если они все же существуют, то они представляют, по его мнению, очень молодые явления.

Таковы главнейшие факты тектонических нарушений, зафиксированные в нашем районе. Одними из них устанавливается проявление каледонского орогенеза, другими значительно более позднего (четвертичного), а третьи вызывают предположение о наличии и варисцийских дислокаций.

Что касается эпейрогенических движений, то ими чрезвычайно богата вся история рассматриваемого района от кембрия и до четвертичного периода включительно. Этими движениями обуславливается несогласие в залегании отдельных толщ и выпадение целых свит из разреза. Главнейшие несогласия установлены между кембрием и силуром, силуром и средним девоном, средним и верхним девоном, верхним девоном и нижним карбоном. Эти несогласия связаны с колебательными движениями земной коры, обуславливавшими смену трансгрессий и регрессий моря, постоянную борьбу моря с сушей, причем нередко эта борьба разыгрывалась не только на всей площади нашего района в целом, но и в отдельных, ограниченных по размерам участках его одновременно существовали различные условия: в одних было море, в других — суша. В отложениях нашего района мы наблюдаем постоянную повторяемость различных фаций морского и континентального типов. Неполнота серии развитых в нашем районе осадочных пород является характерной особенностью геологического разреза. Так, верхний кембрий и нижний девон отсутствуют полностью.

В вышедшей недавно работе Р. Ф. Геккера [3] в пояснении к приводимому профилю характеризуется кратко, но весьма отчетливо, особенность геологического строения южной части Ленинградской области, имеющая очень важное значение в нашем вопросе. Он говорит: „все перечисленные толщи обладают на северо-востоке наименьшей мощностью, либо здесь совершенно выклиниваются — все поверхности размыта сближаются в этом направлении“. Отсюда мы делаем вывод об уменьшенной толще палеозоя в северо-восточном углу нашего района, т. е. о приближении к дневной поверхности докембрийского фундамента, что и находит себе подтверждение в карте магнитных аномалий.

При вышеуказанном характере колебаний уровня моря мы в праве ожидать значительно меняющихся условий как в отношении литологического состава, так и мощностей отдельных свит в различных участках рассматриваемой территории. Между тем, относительно детально геологический состав и строение изучены в северной части этой территории и, вообще говоря, там, где осадочные толщи расположены ближе к дневной поверхности, остальная же большая часть этой территории, где многие свиты уходят в глубину, подвергнута значительно меньшему исследованию. Принимая же во внимание вышеуказанные условия литогенезиса, можно с уверенностью сказать, что характер осадочных толщ, их фациальная изменчивость в южной, большей половине нашего района, нам почти вовсе неизвестны.

При существовании таких неустойчивых во времени и пространстве процессов образования осадков и полной возможности допущения проявления орогенических движений одной или нескольких фаз складчатости — не исключается возможность обнаружения в новых местах структур, подводящих близко к дневной поверхности толщи, которым по геологическим условиям на поверхности надлежало бы залегать глубоко.

Поэтому толкование указанного выше „магнитного хребта“, как действительно существующего крупного по своей протяженности валообразного поднятия докем-

брийского основания, сопровождаемого возможно подобной же структурной формой и нижнего палеозоя, с геологической точки зрения не является неправдоподобным, хотя при первом и беглом взгляде на возраст и характер залегания геологических образований, развитых здесь на поверхности, можно было бы принимать глубокое залегание кристаллического ложа.

Итак, мы можем заключить, что представление о наличии высоких структур на основе данных карты магнитных аномалий не находится в противоречии с геологическими процессами, разыгрывавшимися в прошлом на данном участке земной коры. Вместе с тем, мы не можем утверждать, что эти структуры обязательны и существуют, так как можно принять и другую причину, обуславливавшую появление данной картины распределения магнитных аномалий, а именно: изменение магнитных свойств пород кристаллического ложа. Повидимому, вероятнее всего будет предположение, что обе причины, т. е. изменчивость и содержания магнетита и высотных отметок поверхности кристаллического фундамента, вызывают магнитные аномалии в нашем районе.

Наконец, достаточно отчетливо по магнитным данным и в согласии с геологическими соображениями вырисовывается большая приильменная впадина, располагающаяся к западу от оз. Ильменя.

В иных случаях положение этих двух факторов в различных соотношениях, быть может, и вызывает то нередко прихотливо изменяющееся значение величины и знака аномалий, которые мы особенно ясно видим на картах маршрутных магнитных съемок.

Разграничить области влияния этих двух факторов — задача неразрешимая, и только можно предположить по ряду соображений, что наиболее вероятными высокими структурами будут те, что вырисовываются на юго-востоке и юго-западе нашей карты и в районе к ЮВ от Ладожского озера.

Действительно, на юго-западе (район Симанова лога) купол, образованный повышенными значениями магнитных аномалий, возможно отражает продолжение дислокаций с. Мишиной Горы к Ю и ЮВ: на ЮВ и В (Окуловка, Боровичи и т. д.) сравнительно ярко выраженный магнитный хребет ССВ направления может быть в известной степени увязан с Ловатскими дислокациями, находящимися далее на ЮЗ: этот магнитный хребет протягивается вплоть до юго-восточного побережья Ладожского озера, что не противоречит тому, что именно сюда идет выклинивание палеозойских толщ и сближение поверхностей разрыва, обусловленные наличием выступа докембрийского ложа.

Возможно также, что в отдельных случаях оба эти фактора искажения магнитного поля действуют совместно в одном направлении, т. е. массивы основных пород получили отражение в древнем рельефе, будучи выраженными выпуклостями над более пониженным рельефом основного поля, занятого кислыми породами.

Разбирать детальнее как эти основные, так и более второстепенные структуры мы не будем, считая это преждевременным.

Целью нашего очерка вовсе не было установление существования определенных структур на основе сравнительно редких магнитных наблюдений, а было лишь желание показать, как в свете новых, добытых за последние годы данных о тектонике южной части Ленинградской области, могут быть истолкованы данные магнитных наблюдений, в главной своей части проведенных еще 20 с лишним лет тому назад, когда при тогдашнем знании геологического строения этой территории они вовсе не могли быть интерпретированы. Совершенно ясно также, что для детального выявления геологических структур один магнитный метод недостаточен, и необходимы комплексные геофизические исследования.

Не подлежит никакому сомнению важное значение коренных вопросов геологической структуры Ленинградской области для познания месторождений полезных ископаемых, будь то соли, нефть, природные газы, подземные воды, или многие другие, и для разрешения этих вопросов необходима постановка комплексных геофизических исследований, а именно: магнитных, гравиметрических, сейсмических и, возможно, электрических, а также и бурения 2—3 глубоких скважин в местах наиболее ясно выраженных аномалий геофизического поля. В 1936 г. эти исследования произведены, а результаты их обрабатываются в ЦНИГРИ и пока не опубликованы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хейланд, Геофизические методы разведки (перевод). Гос. техн. издат. 1931 г.
2. Б. П. Асаткин, К вопросу изучения тектоники Ленинградской области. Изв. Ленинградск. геол. гидро-геодез. треста. № 1, 1934 г.
3. Р. Ф. Геккер, К палеогеографии девона русской платформы. Изв. Гос. географич. о-ва, т. 66, вып. 3, 1934 г.
4. А. Д. Архангельский, Геологич. строение СССР, вып. 1, 1934 г.
5. Б. П. Асаткин, Геологические исследования в юго-восточной части 26-го листа геологической карты Европейской части СССР. Труды ГГРУ, вып. 48. 1931 г.
6. М. Э. Янишевский, Геологическая карта окрестностей г. Ленинграда. Описание геологического строения окрестностей г. Слудка. Тр. Союзгеолразведки, вып. 126. 1932 г.
7. М. Э. Янишевский, Очерк геологического строения. Южная часть Ленинградской области. Справочник. Полезные ископаемые Ленинградской области и Карельской АССР, ч. 1. 1933 г.
8. И. В. Даниловский, Геологическое строение бассейна р. Ловати в пределах 27 листа 10-верстной геологической карты. Тр. ГГРУ, вып. 125. 1931 г.
9. А. П. Карпинский, О кембро-силурийских и некоторых других отложениях Псковской губ. Горный журнал, 11. 1887 г.
10. Н. Ф. Погребов, Артезианские воды нижнекембрийских отложений в Ленинградской области. Водные богатства недр земли на службу социалистическому строительству. 1933 г.
11. Н. Н. Соколов, Некоторые данные о рельефе Валдайской возвышенности. Почвы полосы Валдайских конечных морен. Труды Почв. ин-та им. В. В. Докучаева, т. X. вып. 1, 1934 г.
12. Б. П. Асаткин, Древнейшие слои среднего девона Ленинградской области. Изв. Ленингр. геол. гидро-геодез. Труды, № 3. 1934 г.
13. H. Scupin, Ostbaltikum. Algonkium. Paläozoikum und Mesozoikum. Die Kriegsschanplätze 1914—1918 geologisch dargestellt. Heft 9. 1928.
14. Б. П. Асаткин, Проблема сульфидов в южной части Ленинградской области. Разведка недр, № 6. 1936.

THE MAGNETIC FIELD OF THE LENINGRAD DISTRICT

By V. J. Reineke and N. N. Trubiatchinsky

Summary

The paper gives a rough outline of the geological conditions in the Leningrad district, in connection with the distribution of magnetic anomalies.

In analysing a series of arguments for the explanation of the probable geological causes of the distribution of magnetic anomalies in the Leningrad district, the authors draw the conclusion that the approach of a crystalline bed to the surface of the earth, and its simultaneous enrichment with speckles of magnetite, must be regarded as the most probable cause of the magnetic heights in the discussed region.

As a result of the work effected there may be made provisional generalisations of structural geology, necessary for further geophysical and boring work in the said region.

МАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

В 1896 и 1897 гг. Эшенгаген опубликовал статьи, где приводил образцы записи H в Потсдаме. На этой записи ясно виден ряд малых волн почти постоянного периода,

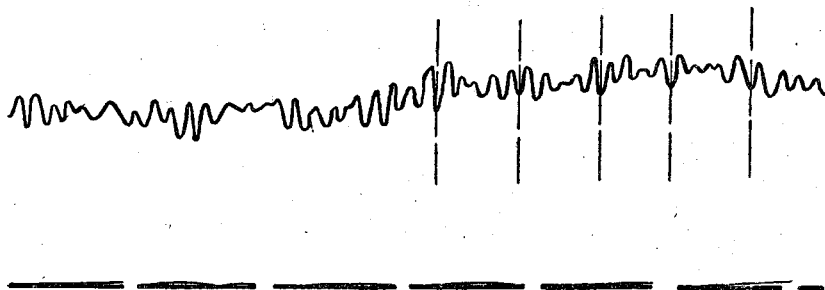


Рис. 1.

как выражается автор, — элементарных волн. Далее он подробно описывает эти волны, получившие впоследствии название магнитных пульсаций или элементарных волн Эшенгагена.

Обычная картина их такова: гармонические колебания, — малые по амплитуде, довольно постоянные по периоду, — простые или сложные. Так как для достаточно точной регистрации их на шкале времени чувствительность приборов, стоявших

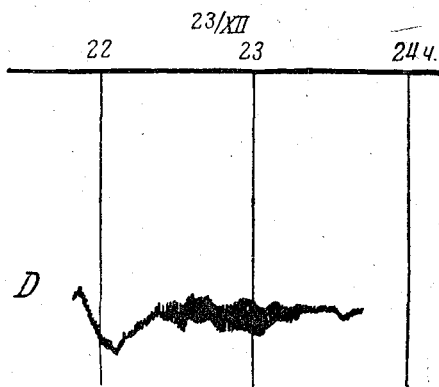


Рис. 2.

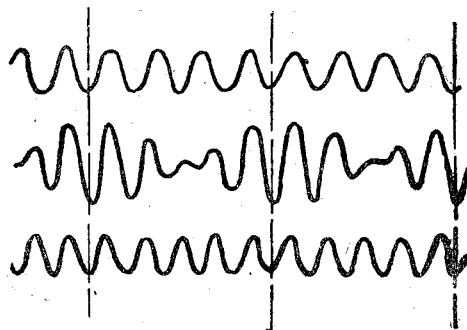


Рис. 3.

в Потсдаме, не была удовлетворительной, Эшенгаген установил новый H -вариометр чувствительности в $0,4 \gamma$, причем час был равен по длине 24 см. При хорошем демпфировании это оказалось вполне достаточным, и при дальнейшем уточнении результаты уже получались худшими. Для того, чтобы быть уверенным в том, что при такой

регистрации особенности приборов не сказываются на записи, Эшенгаген произвел наблюдения на 2 приборах, давших совершенно одинаковые результаты.

Обычный вид пульсации при такой записи приведен на рис. 1 и 4.

Приведу еще образчик крупных пульсаций в обсерватории на о-ве Диксон. Чувствительность 9,18 γ и шкала времени 20 мм = 1 ч. (рис. 2).

Рассматривая запись, приведенную на рис. 1, Эшенгаген обратил внимание на то, что на ней ясно видны группы сложных колебаний, повидимому, получившихся от сложения двух рядов гармонических колебаний.

Если через a_1 и a_2 обозначить половины амплитуд обеих групп, T_1 и T_2 — их периоды, T — продолжительность интервала колебания, то оба гармонических колебания выразятся так:

$$y_1 = a_1 \sin \frac{2\pi}{T_1} t;$$

$$y_2 = a_2 \sin \frac{2\pi}{T_2} (t - \tau),$$

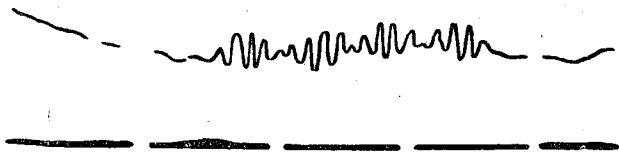


Рис. 4.

где τ — сдвиг фаз.

Отсюда получается $T_1 = mT$ и $T_2 = nT$, где m и n — число колебаний. Тогда результирующая волна

$$y = y_1 + y_2 = a_1 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t}{m} + a_2 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t}{n}.$$

Если применить это к приведенной записи, то $m:n = 4:5$; отдельное сложное колебание тянется 171 сек., откуда $T_1 = 43$ сек. и $T_2 = 34$ сек. Если построить обе системы волн и сложить их, то, как видно из рис. 3, получится исключительное подобие.

Кроме того, Эшенгаген показал и на опыте, что причина простых и сложных пульсаций внешняя.

Для этого он установил 2 магнита в стороне от прибора так, что мог их вращать и одновременно и порознь друг от друга. Таким образом он получил и простые и сложные колебания на записи, похожие на действительно наблюдаемые. Одну из таких опытных записей и воспроизводит рис. 5.

Кольрауш в 1882 г., правда во время бури и отсчитывая через минуту наглаз, также наблюдал пульсации и описал их. У него периоды были около 17 сек., в то время как Эшенгаген не наблюдал ниже 30 сек.

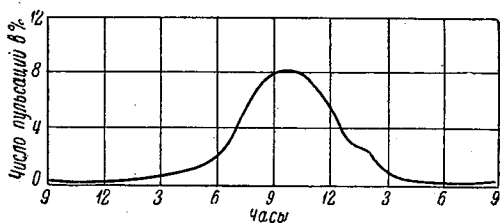


Рис. 5.

Уже оба эти автора ставят вопрос о необходимости исследования явления с точки зрения их географического распределения, одновременности их на всей земле, постоянства их периодов, связи этих явлений с солнечным освещением. Эшенгаген сделал попытку сопоставления записей разных обсерваторий, но это ему не удалось сделать, главным образом, из-за малой чувствительности самописцев. Только в случае сопоставления записей в Потсдаме и Вильгельмсгафене это удалось, и им была отмечена совершенная одновременность происходившей тогда пульсации в пределах точности сопоставления, т. е. до нескольких секунд. Отсюда он сделал заключение, что пульсации одновременны, если не по всей земле, то, по крайней мере, на больших площадях. Он особенно настаивает на необходимости таких сопоставлений, считая, что только после такого выяснения возможно делать какие-либо предположения об их природе.

Кроме этого, он отмечает, что ему обычно приходилось наблюдать днем более короткие периоды пульсаций, чем ночью.

Для получения скоростей вариаций он советует употреблять кольца с чувствительным гальванометром.

Арендт занялся почти одновременно с Эшенгагеном вопросом, есть ли какая-либо закономерность в появлении пульсаций и нельзя ли найти какую-либо связь их с электрическими процессами в атмосфере. Как он выражается, эта форма „вызывает особый интерес, напоминает несколько о тех процессах движения, которые иногда испытывает магнитная стрелка при молниевых разрядах“.

Арендт в своей работе приводит амплитуды в склонении до 3 мин., в горизонтальной составляющей до 30 γ и в вертикальной составляющей до 5 γ, а продолжительность — от получаса до двух часов. Затем, произведя сводку материала за 5 лет, Арендт находит и ясно выраженную периодичность, представленную на рис. 6, где на абсциссах отложены часы дня, а на ординатах — число пульсаций.

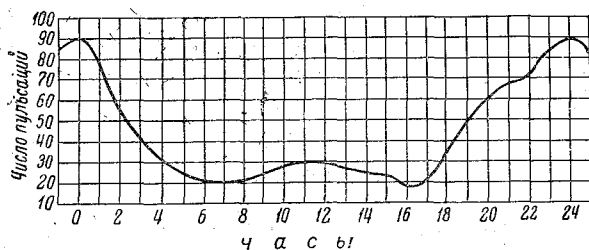


Рис. 6.

Но на этой связи он не настаивает, считая, что материал недостаточно полон, и лишь выражает надежду, что при накоплении его можно будет говорить об этом уверенно. Впоследствии никем не было этой связи обнаружено. Эберт, основываясь на том, что область распространения пульсаций очень широка, резко отрицает связь их с местными явлениями.

Выяснению вопросов с пульсациями были посвящены две работы ван-Беммелена, разделившего их на два вида: 1) пульсации и 2) спазмы — исключительно быстрые пульсации, не делимые при наших возможностях записи.

В 1917 г. de Moidrey опубликовал свою работу, являющуюся сводкой материалов обсерватории в Зи-Ка-Вее с 1896 по 1912 г. и Лу-Киа-Панге с 1913 по 1916 г.

При обработке он разделил пульсации на 3 класса:

быстрые	с периодом от 1,0 до 1,5 мин.
средние	„ „ 1,5 „ 1,9 „
медленные	„ „ 2,0 „ 2,5 „

Это деление и границы его были совершенно произвольны. Обнаружить вековой ход при этих исследованиях не удалось.

И о годовом ходе из этой работы нельзя сделать достаточно надежных заключений.

Для суточного хода ему удалось получить следующую таблицу и график (в таблице приведены числа пульсаций до 1000, не сглаженные методом двойных средних; обозначения часов 0, 1, 2 и т. д. означают соответственно интервалы 0—1, 1—2, 2—3 и т. д.).

Если сопоставить число пульсаций в спокойные в магнитном отношении годы и в активные, то разница этих чисел очень велика. В то время как 1910—14 гг. дают максимум 50,2 и минимум 17,8, 1904—1908 гг. (бурные) дают максимум 4,0 и минимум 2,6.

De Moidrey привел график суточного хода в спокойные и в бурные годы; я его даю (рис. 7) как довольно показательный для ясного представления о частоте пульсаций в различные годы в зависимости от их бурности. На этом графике дан также

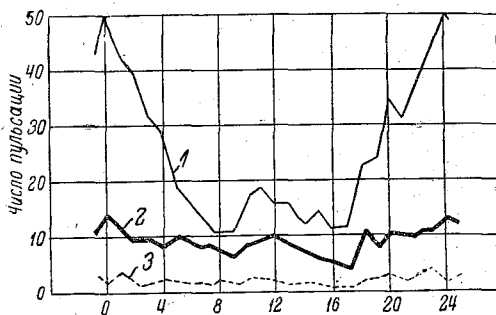


Рис. 7.

и ход в 1916 г., особо богатом пульсациями. Год этот приведен как несколько отличный от прочих; даже суточный ход в нем плохо виден.

На чертеже сплошной линией изображен суточный ход в спокойные годы, ниже точечным пунктиром — в бурные и штриховым пунктиром — ход в 1916 г. На абсциссах отложены часы, на ординатах — число пульсаций.

Увеличение числа пульсаций в спокойные в магнитном отношении годы резко бросается в глаза.

Таблица 1

Часы	Пульсации	Часы	Пульсации
0	88,9	12	29,6
1	78,5	13	28,0
2	58,2	14	26,4
3	42,6	15	24,3
4	32,2	16	18,8
5	25,4	17	21,6
6	22,0	18	36,6
7	21,2	19	50,0
8	22,3	20	60,1
9	25,2	21	67,3
10	29,5	22	75,1
11	31,4	23	84,9

Суточный ход в различные времена года не разнится заметно, разве только летом особо выделяется полуденный максимум. Также одинаков суточный ход для различных классов пульсаций: быстрых, средних и медленных — различия, повидимому, объясняются недостаточностью материала.

Кроме того, что было сделано для обычных пульсаций, De Moidrey пытался выяснить и суточный ход спазмы. Для него он получил график, отличающийся от графика суточного хода вариаций, но и это отличие он относит к той же нехватке материала, его неоднородности, дефектам записи и т. д.

В 1926 г. Педдер пытался сопоставить пульсации с микросейсмическими явлениями, но его работа была мало убедительна.

К. Штермер в 1906 г. и 1931 г. пытается дать объяснение тому, как возникают эти „элементарные волны Эшенгагена“. Он полагает, что здесь сказывается действие масс электрических корпускул, которые несутся „облаками“ к земле от солнца, и двигаются около земли некоторое время по различным периодическим орбитам.

Штермер считал, что его объяснение более вероятно, чем другие, на том основании, что пульсации одновременны по всей земле (этого же мнения придерживался и Ангенгейстер в своей статье о земном магнетизме в „Handbuch der Physik“). Как мы увидим далее, это положение об одновременности пульсаций, повидимому, не совсем верно. В 1931 г. Штермер для проверки своей гипотезы сделал расчет возможных скоростей корпускул, периода их обращения по указанным выше орбитам и вида этих орбит. Одновременно с его работами Брюхе сделал экспериментальную проверку теории, и его результаты подтвердили ее. На приложенном рисунке приведены две из большого числа орбит, рассчитанных Штермером. Эти рисунки (рис. 8) даны для каждой орбиты попарно. В нижней части — проекция орбиты на плоскость XY , в верхней — на XZ . Элементарный магнит, представляющий землю, находится на чертежах в начале системы координат с осью вдоль оси Z , южным полюсом кверху, —

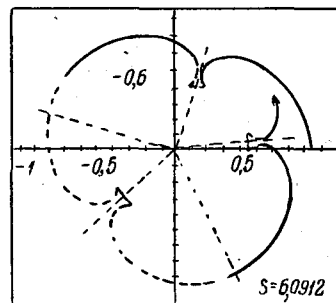
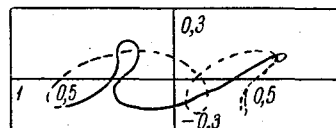
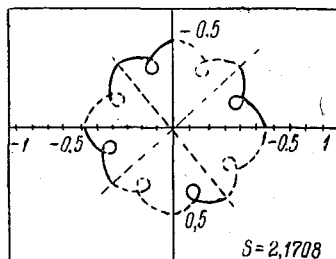
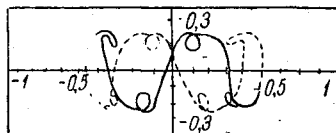


Рис. 8.

иными словами, воспроизводит магнитную ось земли. Плоскость XY — плоскость магнитного экватора, проходящая через центр земли нормально к магнитной оси.

Движение отрицательных корпускул происходит вокруг земли с S через E к N, а для положительных — в противоположном направлении. На каждом чертеже нанесен период s , т. е. длина периодической части пути; этот период измеряется Штермером в единице длины, равной

$$(M_e/mv)^{1/2} \text{ см,}$$

где $M = 8,4 \times 10^{25}$ (магнитный момент земли); v — скорость корпускул в сантиметрах в секунду; $\frac{m}{e}$ — отношение масс и заряда корпускулы в электромагнитных единицах;

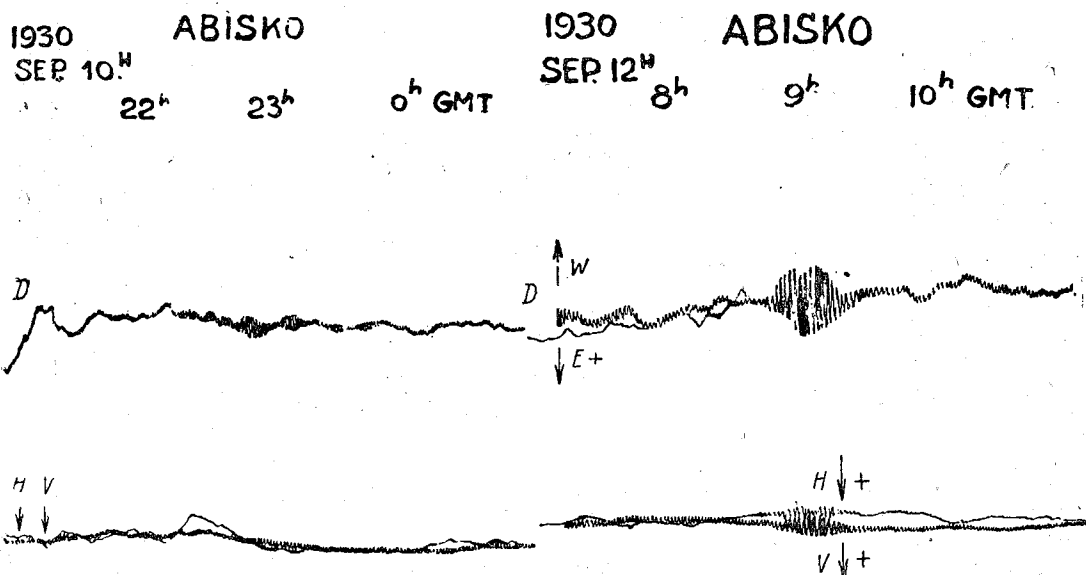


Рис. 9.

T — время в секундах, нужное корпускуле для прохождения ею периодической части орбиты s' измерения так:

$$T = (M_e/mv)^{1/2} \frac{s'}{v}$$

наблюдаемым необходимо сравнивать этот период.

Штермером дан ряд таблиц, где для электронов и частиц, при различных их скоростях, произведено такое сопоставление периодов. Согласие, полученное для наблюдаемых и вычисленных T , исключительно хорошо. То же, что подсчеты не охватили всего разнообразия наблюдающихся периодов, автор теории объясняет существованием бесконечного числа более сложных орбит, часто переходящих друг в друга. Казалось бы, что этим всем вопрос о пульсациях достаточно разъяснен. Но Bruno Rolf в Абиско обратил внимание на особо выдающиеся по своей величине пульсации, зарегистрированные самописцами 10 и 12 сентября 1930 г. Обычно в Абиско пульсации регистрируются довольно редко из-за малой чувствительности вариометров (северная составляющая имеет чувствительность 14γ на 1 мм, восточная — 34γ и вертикальная — 23γ). Указанная пульсация была исключительной по своей величине, как ее называет Rolf „True giant amongst dwarfs“. Вид этой пульсации приведен на рис. 9.

Все явление продолжалось 1 час. 27 мин. 10 сентября, и во время него было зарегистрировано 50 полных периодов со средней величиной в 111 секунд. При сопоставлении этой пульсации с записью обсерватории в Тромсе было найдено, что во время феномена горизонтальный вектор возмущения вращался по часовой стрелке

Таблица 2

Размер пульсаций около 9 час. гринвичского среднего времени
12 сентября 1930 г.

Обсерватория	Расстояние в км	Составляющая		
		X	Y	Z
Абиско	0	14	34	23
Тромзе	149	16	30	10
Соданкюла	347	7	9	6
Кандалакша	591	3	2	1
Бодо	631	3,1	2,7	1
Лово	1005	< 1	< 1	< 1
Павловск	1119	< 1	< 1	< 1
Руде Сков	1432	1?	1	1
Седдин	1819	0	0	0
Де-Бильт	1954	0	0	0
Годхавн	2742	0	0	0

и по эллипсу, большая ось которого направлена на СВВ, а малая — на ВЮВ. Сопоставление, произведенное Rolf'ом с материалами других обсерваторий, сведено им в табл. 2. Как видно, эта пульсация охватила не всю землю, а, главным образом, участок Скандинавии. Это наглядно показала изготовленная мною карта изменения интенсивности пульсации для северной составляющей по данным табл. 2, причем изолинии были проведены через 5 γ.

Rolf полагал, что причиной описанной пульсации являются токи в атмосфере над северной Скандинавией, причем если почва Абиско и Тромзе одинаково электропроводна, то надо полагать, что над Тромзе находилось главное место возмущения. Интересно указание Ниппольдта, приведенное в примечании к работе, о том, что с 1903 г. пульсации в Потсдаме „went to sleep“ („заснули“) и с тех пор очень редки.

Приблизительно с 1924 г. в Тромзе сделана установка для наблюдения полярных сияний, а также магнитная установка. Во время описанной выше пульсации в Абиско удалось обнаружить по записям Тромзе значительную разность фаз между D и H . Тогда было сделано дополнительное приспособление, дающее возможность подробнее исследовать явления, происходящие во время отдельной пульсации. В этой установке на записях получалось 2 кривых (одна сплошная, другая из точек). Одну из кривых, приведенных в статье L. Nagang'a, можно видеть на рис. 11.

Кроме того для более детального исследования пульсаций в Тромзе приготавлились микрофотографии кривых, полученных во время работы вариометров, как, например, приведенная на рис. 12.



Рис. 10.

С помощью этой записи и специальных на ней марок времени производилось измерение ординат на кривых для точно определенных отдельных моментов времени и затем, пользуясь следующими формулами, для вектора возмущения:

$$\Delta W = A_D \cos \frac{2\pi t}{T}; \quad \Delta N = A_N \cos \left(\frac{2\pi t}{T} + \alpha \right); \quad \Delta v = A_v \cos \left(\frac{2\pi t}{T} + \beta \right);$$

$$P = \sqrt{\Delta W^2 + \Delta N^2 + \Delta v^2},$$

составленными в предположении, что колебания гармоничны, определялась величина P вектора и разности фаз α и β (ошибка в определении фаз могла доходить до $15-20^\circ$). Нагаг привел в своей статье два случая изменения вектора возмущения во время двух пульсаций, вычисленные указанным образом. Они приведены на рис. 13. Следует еще упомянуть, что Нагаг произвел снова уже сделанную Эшенгагеном проверку того, что влияния различных вариометров на различие пульсаций нет.

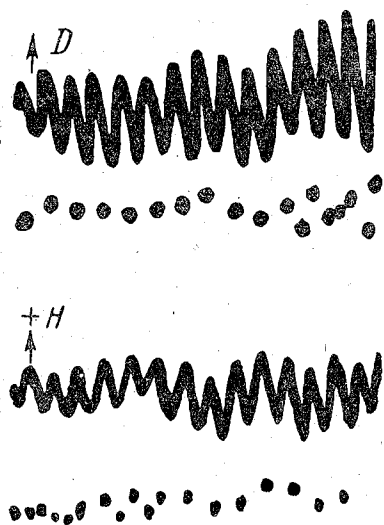


Рис. 11.

они явлением повсеместным и одновременным на всей земле, либо только локальным, обнимающим лишь участки земли, хотя бы и большие, наконец, даже вопрос о периодичности пульсаций, — все эти вопросы, если подвинулись к разрешению, то очень мало. Ясна необходимость еще значительной работы в этой области. СССР находится в особо выгодных условиях для возможности проведения такой работы, располагая сетью обсерваторий на огромном участке земли и возможностью ведения работ на них по заранее выработанному плану.

Согласно постановлению Всесоюзной сессии по земному магнетизму и атмосферному электричеству в 1933 г. мною на Слуцкой обсерватории и была начата работа над статистической обработкой уже имеющегося на обсерватории материала.

Своей ближайшей задачей я разумел выяснение вопроса, есть ли какая-либо периодичность в появлении пульсаций в Слуцке и если есть, то какова она; иными словами, есть ли суточный ход числа пульсаций, зависимость от бурности дней, характеристик и т. д.

Приступая к работе, мне прежде всего пришлось столкнуться с методикой подсчета. Дело в том, что на записях Слуцкой обсерватории пульсации появляются не

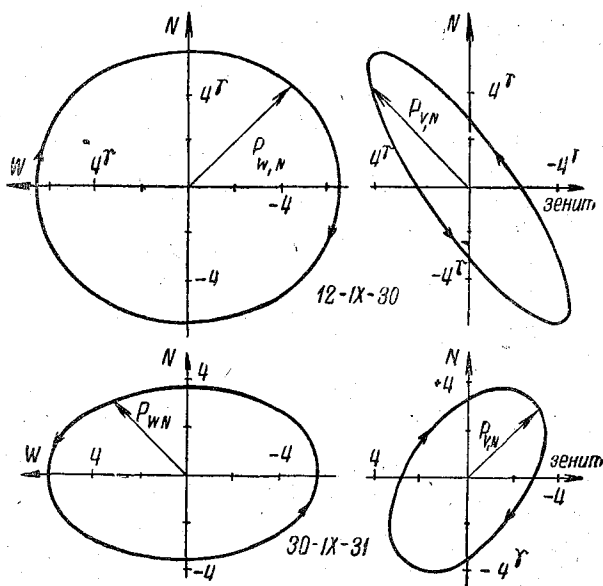


Рис. 12.

только отдельными резко ограниченными, а как бы цепью, иногда прерывающейся совершенно на короткий промежуток времени, иногда переходя из одного вида колебаний в другой, несколько отличный по характеру. Такая группа может тянуться в течение 2—3 часов и даже больше. При подсчете поэтому очень часто возникает вопрос, что считать одной и что—несколькими пульсациями. Я выбрал несколько иной путь, ведя подсчет числа часов, в которые были пульсации. Таким образом я считал возможным составить представление о суточном ходе пульсаций по повторяемости одних и тех же часов с ними. Этим способом и велся подсчет за 10 лет (с 1923 по 1933 г.), причем было зарегистрировано около 20 000 часов с пульсациями (случаи пульсаций во время бурь часто опускались из-за сомнительности).

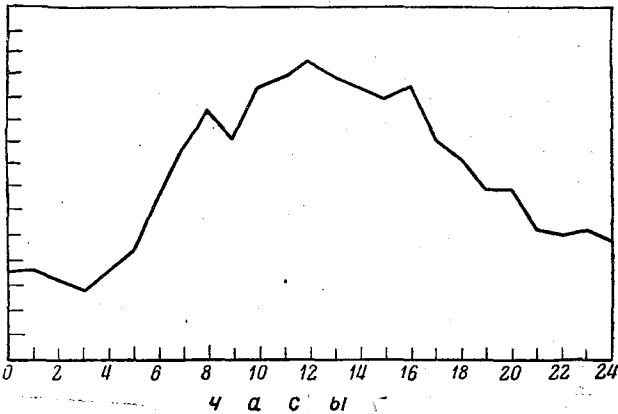


Рис. 13.

Весь полученный материал был сведен в общую таблицу, причем 1) была взята сумма всего числа часов с пульсациями для каждого часа каждого месяца и 2) для каждого дня каждого месяца.

Так, были получены таблицы для каждого года (см. табл. 3). Затем взято среднее арифметическое из значений для каждого отдельного часа за 10 лет, и эти числа

Таблица 3

GMT ¹ Час	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма
1	8	6	5	6	6	8	6	8	7	6	5	4	75
2	7	6	5	6	6	7	6	8	7	6	4	4	72
3	5	5	6	5	7	8	6	8	7	5	4	3	69
4	6	4	7	6	7	10	8	7	7	7	4	4	77
5	6	4	7	7	8	11	8	8	8	7	6	5	85
6	7	7	8	8	11	12	8	11	12	8	8	6	105
7	9	8	7	9	10	15	12	14	12	10	9	6	124
8	9	10	10	12	13	15	12	15	13	13	10	8	140
9	9	9	9	11	12	14	13	15	14	13	10	9	138
10	10	9	11	11	11	16	14	15	15	14	12	10	148
11	11	9	11	10	11	15	15	16	15	16	12	11	152
12	11	9	12	11	14	15	14	17	14	16	12	13	158
13	12	10	12	9	13	15	13	15	14	14	12	12	151
14	11	9	11	11	14	14	13	15	15	14	11	11	149
15	11	10	10	11	13	13	12	15	15	14	9	10	143
16	12	10	12	12	13	12	13	15	15	14	9	10	147
17	11	9	11	10	12	12	11	14	12	12	8	6	128
18	10	8	9	10	10	12	12	13	10	10	8	7	119
19	10	7	8	8	11	10	11	12	9	8	7	6	107
20	9	9	8	7	11	11	11	12	9	7	7	7	108
21	8	8	8	7	9	7	9	9	8	8	6	6	93
22	8	7	6	9	7	8	9	9	7	8	5	7	90
23	8	7	7	8	9	10	7	10	8	7	4	6	91
24	8	7	7	8	7	7	9	11	8	6	4	5	87
Сумма . .	216	187	207	212	247	277	252	292	261	243	186	176	2756

¹ Гринвичское среднее время.

внесены в окончательные таблицы (второй таблицы я не привожу, так как она не обнаружила никакой закономерности).

Ниже приводятся графики, построенные на основании этой таблицы. Конечно, все данные, касающиеся Случка и приводимые в этой статье, могут измениться при добавлении новых материалов или обработке новыми методами. Однако надо полагать, что приводимые графики дают достаточное представление о суточном ходе пульсаций в смысле их распространения по часам дня или месяцам. Рассмотрим график суточного хода за весь год (как среднее из 10 лет) (рис. 14).

На этом графике на абсциссах отложены часы дня, а на ординатах — число часов с пульсациями, взятое из последнего столбца таблицы 3. Из этого графика ясно виден максимум пульсационных часов у полудня, притом довольно широкий и не очерченный резко; минимум около 3-х часов ночи. Приблизительно около

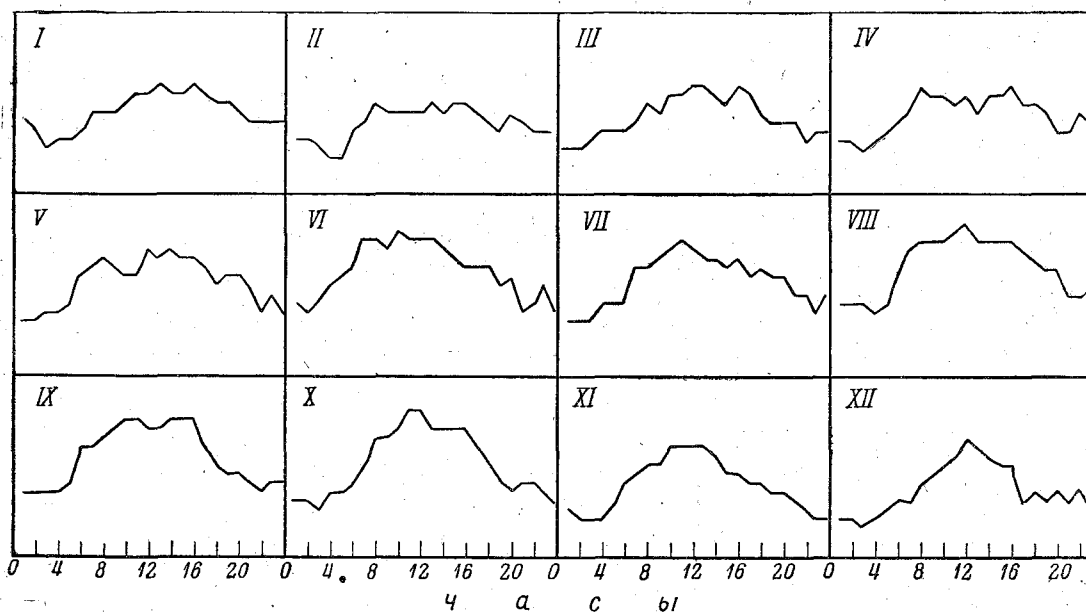


Рис. 15.

6 час. утра пульсации появляются все чаще, у середины дня частота их появления наибольшая, затем около 6 час. вечера их число сильно спадает. Совершенно ту же картину дают кривые, составленные для каждого месяца отдельно (по данным табл. 3, рис. 15).

Там так же, как и на годовом графике, ясно виден максимум у полудня и утренний минимум. Здесь видна еще одна особенность частоты появления пульсаций. Они появляются все чаще по мере приближения к летним месяцам, и, кроме того, зона максимума все становится шире; затем, к зимним месяцам они появляются реже, и ширина максимальной части кривой к декабрю переходит даже в остро очерченный максимум.

Если перейти к кривой, дающей частоту пульсаций в зависимости от месяцев года (по последней строке приведенной таблицы 3), то обращает на себя внимание то, что пульсации появляются все чаще к лету, причем месяцы наибольшей частоты их июнь—август, затем они опять становятся реже, доходя в декабре до минимума (рис. 16).

Рис. 17 дает представление о зависимости частоты появления пульсаций от времени года (нижняя точка — число часов с пульсациями в 4 зимних месяца, вторая — в 4 равноденственных и третья — в 4 летних). Из этого графика ясно видно, насколько чаще пульсации летом, чем зимой.

Чтобы сопоставить эти предварительные результаты с материалами работы de Moidrey, скажу несколько слов о том, в каких пределах я брал для своей работы пульсации. Во-первых, они брались с амплитудами не ниже 0,4 γ. В отношении периода я учитывал в пределах от 0,2 до 2,5 мин.; это соответствует той гамме периодов и амплитуд, которые брал de Moidrey, с той только разницей, что я не разделял их на 3 класса по периодам, как это сделал он (кстати, не найдя различия между ними). В своей работе он находит максимум около 24 час. (или 0 час.) по местному времени. Восточная долгота Зи-Ка-Вея $121^{\circ}26'$, а Слуцка $30^{\circ}29'$, т. е. разница в долготе между обеими обсерваториями около 6 часов. Отсюда следует, что максимум в Зи-Ка-Вее наступает в 16 час. GMT, а в Слуцке — в 10 час. GMT, т. е. неодновременно, а именно в Зи-Ка-Вее на 18 часов раньше или на 6 позже, чем в Слуцке. Очень странна некоторая зеркальность кривых, полученных в Слуцке и Зи-Ка-вее: создается такое впечатление, что произошло как бы обращение кривых.

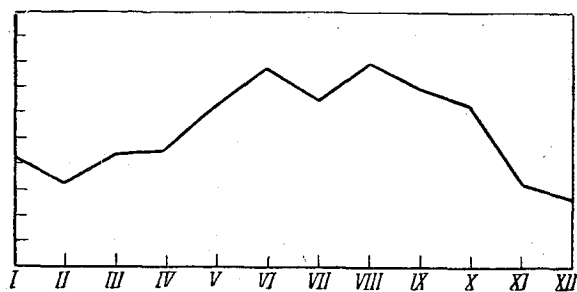


Рис. 16.

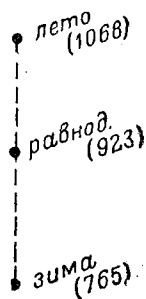


Рис. 17.

Что касается замеченной de Moidrey большой разницы между бурными и спокойными годами, то у меня из слущких материалов она не вытекает так ясно, как у него.

Что же касается меньшего числа пульсаций в бурные дни, то мне кажется, что крупные вариации (как уже и говорилось выше) затушевывают малые колебания пульсаций, и поэтому их учесть трудно.

Попытки сопоставления частоты пульсаций с магнитными характеристиками педидали никаких положительных результатов — связи никакой не обнаружено. То же и относительно месячного хода частоты пульсаций. Очень хочется вспомнить замечание Ниппольдта по поводу исключительной редкости теперь пульсаций в Потсдаме в связи с тем, что попытки выведения суточного хода, сделанные в Свердловской обсерватории Р. Г. Абельсом, не увенчались успехом из-за трудности отыскания пульсаций на записях Свердловска.

Вернусь немного назад к графикам суточного хода пульсаций. Эшенгаген уже высказал мысль о связи пульсаций с дневным освещением солнцем. И если с этой точки зрения рассмотреть эти графики, то они также кажутся подтверждающими этот взгляд. Действительно, 1) полуденный Мх на годовом графике с подъемом кривой по восходе солнца и опусканием ее по заходе; 2) график частоты по месяцам с расширением максимальной зоны летом в период наибольшего освещения солнцем и острым (узким) максимумом зимой, когда солнце бывает в Слуцке несколько часов; 3) распределение пульсаций по месяцам с максимумом их летом и минимумом зимой; 4) разница между числом пульсаций в зимние месяцы, равноденственные месяцы и летние — все это как бы говорит в пользу точки зрения Эшенгагена. Однако я считаю, что лучше воздержаться от заключений, пока материал не будет более полным.

В дальнейшем, повидимому, придется разделить пульсации при обработке не только по признаку длины периода, но и по виду самих пульсаций, кроме того, составить параллельно два графика: частоты часов пульсаций и чисел пульсаций.

Кроме того, намеченная работа по определению одновременности пульсаций или локальности, возможно, даст указания на тип пульсаций, который необходимо будет выделить при обработке.

После составления этой статьи в печати, на западе вышли в свет две очень существенные работы¹ по пульсациям.

Первая статья дает результат работы над суточным, годовым и вековым ходами в Самоа за 1913—1920 гг. и сопоставления их с Potsdam'ом, Batavia, Zi-Ca-Wie, Buitzensorg'ом. Lübiger получил выводы, очень близкие к выводам de Moidrey. Максимум числа пульсаций в Самоа за день падает на 2^h GMT, годовой на III, будучи не очень сильно выраженным. Во второй работе L. Harang, на основании материалов Тромзе за 1929—1934 гг., получает графики суточного и годового хода числа пульсаций сходные с Lübiger'ом. У него суточный максимум около 2 GMT, в году 2 четких максимума у III и IX и вторичный в VII. В остальном вторая работа является продолжением прежней, изданной в 1932 г.

Таким образом противоречие моих результатов с работой de Moidrey не только осталось, но и усилено тем, что новые данные поддерживают результаты Зи-Ка-Вея.

MAGNETIC PULSATIONS

By *P. E. Fedulof*

Summary

The first part of the present paper contains a historical review of the development of the pulsation problem. References are made to the works of Eschenhagen, Arendt, de Moidrey, Pödder, Störmer. A somewhat more detailed description is given of the works of Rolf and Harang on gigantic pulsations. The second part of the paper gives a description of the first stage in the reduction of the materials, for a period of 10 years, of the Magnetic Observatory in Slutzk. The method used in calculating the frequency of recurrence is described and a summary of the results given. The maximum at noon (mean Greenwich time) is clearly pronounced; the minimum (not sharply defined) is at 3^h mean Greenwich time. In the winter the maximum is both narrower and more acute than in the summer. There are more pulsations in the summer than in the winter. The impression created coincides with the idea of Eschenhagen of a connection with the lighting of the earth by the sun.

The papers of Lübiger and Harang, which appeared later, confirm the results obtained by de Moidrey.

¹ F. Lübiger. Über die vom Samoa-Observatorium registrierten erdmagnetischen Pulsationen. Ztschr. f. Geophys. 1935. Hpt 3.

Leiv Harang. Report on sinusoidal oscillations which occurred in the rapid registration records in Bossekop, Tromsø and Bodø, Norw. Public. from the Pol. Year 1932—1933. 1935.

О ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА В АНОМАЛЬНОМ ПОЛЕ

Вопрос о вариациях земного магнитного поля в области аномалий до последнего времени не получил еще окончательного ответа ни с теоретической ни с экспериментальной точки зрения. До сих пор оставалось невыясненным — меняется ли характер вариаций при переходе из нормального поля в аномальное и в какой мере. Для выяснения этих вопросов летом 1936 г. Слуцкой магнитной обсерваторией была предпринята работа по изучению вариаций в области Курских магнитных аномалий.

Для этой цели на одном из максимумов аномалии около села Долгая Поляна были установлены временные вариационные станции, которые работали в течение сентября. Одна из станций была построена на максимуме вертикальной составляющей ($Z = 1,8$ CGS), другая же на максимуме горизонтальной составляющей ($H = 0,7$ CGS).

Сравнение результатов наблюдений этих станций с наблюдениями Нижнедевицкой обсерватории показало, что вариации в аномальном поле имеют тот же порядок, что и в нормальном, с некоторым отступлением от нормального хода.

Детальное теоретическое рассмотрение вопроса о характере вариаций в аномальном поле показывает, что в случае индуктивного происхождения аномалий, вариации в Курской аномалии должны были быть во много раз сильнее нормальных. В случае же аномалий, имеющих своим происхождением постоянный магнетизм горных пород, вариации в аномальной области должны быть тождественны с вариациями нормального поля. Результаты наблюдений показали, что Курская аномалия имеет в основном своим происхождением постоянное намагничение, и только часть поля обусловлена индуктивным происхождением. Разделить индуктивную часть поля от постоянной, по наблюдениям двух временных станций, не удалось вследствие малой чувствительности самописцев.

§ 1. Теория

Прежде чем перейти к анализу результатов наблюдений, рассмотрим теоретически: каковы должны быть вариации в аномальном поле и какие выводы могут быть сделаны из наблюдений над вариациями в аномальном поле.

Положим, что под земной поверхностью находится намагниченная порода A , которая на поверхности в точке P создает аномальное поле $\vec{H}_a$.

Из теории магнетизма известно, что

$$\vec{H}_a = \text{grad} \int \int \frac{(\vec{I}_a \cdot \vec{ds})}{r} - \text{grad} \int \int \int \frac{\text{div} \vec{I}_a}{r} dv, \quad (1)$$

где $\vec{I}_a$ — интенсивность намагничения породы; r — расстояние элемента объема dv или элемента поверхности породы от точки P . Интегрирование же распространяется на весь объем и всю поверхность породы A .

Намагничивание породы $\vec{I}_a$ в общем случае может быть двоякого рода: остаточное намагничивание $\vec{I}_r$, вызванное неизвестными причинами, и намагничивание $\vec{I}_0$, вызванное земным полем, поэтому мы можем написать:

$$\vec{I}_a = \vec{I}_r + \vec{I}_0, \quad (2)$$

причем

$$\vec{I}_0 = \chi \vec{H}_n,$$

где $\vec{H}_n$ — вектор нормального земного поля; χ — магнитная восприимчивость породы.

Соответственно этому и вектор $\vec{H}_a$ будет представлять собою сумму двух векторов:

$$\vec{H}_a = \vec{H}_r + \vec{H}_0. \quad (3)$$

При этом, согласно уравнению (1),

$$\begin{aligned} \vec{H}_r &= \text{grad} \int \int \left(\frac{\vec{I}_r \vec{ds}}{r} \right) - \text{grad} \int \int \int \frac{\text{div} \vec{I}_r}{r} dv; \\ \vec{H}_0 &= \text{grad} \int \int \left(\frac{\vec{I}_0 \vec{ds}}{r} \right) - \text{grad} \int \int \int \frac{\text{div} \vec{I}_0}{r} dv. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как $\vec{I}_0 = \text{const}$ и интегрирование берется по координатам точек породы, а операция градиента по координатам точки P , то предыдущее выражение для $\vec{H}_0$ примет вид:

$$\vec{H}_0 = \int \int \text{grad} \left(\frac{\vec{I}_0 \vec{ds}}{r} \right).$$

По формулам векторной алгебры скалярное произведение $(\vec{I}_0 \vec{ds})$ можно заменить выражением:

$$(\vec{I}_0 \vec{ds}) = I_x dydz + I_y dxdz + I_z dxdy, \quad (5)$$

где I_x, I_y, I_z — составляющие вектора $\vec{I}_0$ по оси x, y и z , а $dydz, dxdz, dxdy$ — составляющие вектора $\vec{ds}$ на те же оси.

Подставляя это выражение в уравнение (4) и помня, что I_x, I_y и I_z — величины постоянные, получим:

$$\vec{H}_0 = I_x \int \int \text{grad} \frac{1}{r} dydz + I_y \int \int \text{grad} \frac{1}{r} dxdz + I_z \int \int \text{grad} \frac{1}{r} dxdy,$$

или, так как $\text{grad} \frac{1}{r} = \frac{\vec{r}}{r^3}$, получим:

$$\vec{H}_0 = I_x \left[\int \int \frac{\vec{r}}{r^3} dydz \right] + I_y \left[\int \int \frac{\vec{r}}{r^3} dxdz \right] + I_z \left[\int \int \frac{\vec{r}}{r^3} dxdy \right].$$

Выражения в квадратных скобках представляют собой некоторые векторы, которые для краткости мы обозначим через $\vec{a}, \vec{b}$ и $\vec{c}$. В таком случае можем написать:

$$\vec{H}_0 = I_x \vec{a} + I_y \vec{b} + I_z \vec{c}.$$

Составляющие I_x, I_y и I_z согласно законам магнитной индукции пропорциональны составляющим вектора нормального поля X_n, Y_n , и Z_n , т. е.

$$I_x = \kappa_1 X_n; I_y = \kappa_2 Y_n; I_z = \kappa_3 Z_n,$$

где κ_1, κ_2 и κ_3 — так называемые кажущиеся магнитные восприимчивости в направлениях x, y и z .

Следовательно

$$\vec{H}_0 = \kappa_1 X_n \vec{a} + \kappa_2 Y_n \vec{b} + \kappa_3 Z_n \vec{c}.$$

Составляющие же вектора $\vec{H}_0$ по оси x, y и z выразятся:

$$X_0 = \kappa_1 a_x X_n + \kappa_2 b_x Y_n + \kappa_3 c_x Z_n;$$

$$Y_0 = \kappa_1 a_y X_n + \kappa_2 b_y Y_n + \kappa_3 c_y Z_n;$$

$$Z_0 = \kappa_1 a_z X_n + \kappa_2 b_z Y_n + \kappa_3 c_z Z_n,$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_x &= \iint \frac{x}{r^3} dydz; & a_y &= \iint \frac{y}{r^3} dydz; & a_z &= \iint \frac{z}{r^3} dydz; \\ b_x &= \iint \frac{x}{r^3} dx dz; & b_y &= \iint \frac{y}{r^3} dx dz; & b_z &= \iint \frac{z}{r^3} dx dz; \\ c_x &= \iint \frac{x}{r^3} dz dy; & c_y &= \iint \frac{y}{r^3} dx dy; & c_z &= \iint \frac{z}{r^3} dx dy. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Составляющие полного аномального вектора $\vec{H}_0$, согласно уравнению (3), будут:

$$\left. \begin{aligned} X_a &= X_r + \kappa_1 a_x X_n + \kappa_2 b_x Y_n + \kappa_3 c_x Z_n; \\ Y_a &= Y_r + \kappa_1 a_y X_n + \kappa_2 b_y Y_n + \kappa_3 c_y Z_n; \\ Z_a &= Z_r + \kappa_1 a_z X_n + \kappa_2 b_z Y_n + \kappa_3 c_z Z_n. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Вариациям подвержено лишь нормальное земное поле. Поэтому, варьируя уравнения, мы и получим зависимость вариаций аномального поля $\delta \vec{H}_a$ в зависимости от вариаций нормального поля $\delta \vec{H}_n$ в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} \delta X_a &= \kappa_1 a_x \delta X_n + \kappa_2 b_x \delta Y_n + \kappa_3 c_x \delta Z_n; \\ \delta Y_a &= \kappa_1 a_y \delta X_n + \kappa_2 b_y \delta Y_n + \kappa_3 c_y \delta Z_n; \\ \delta Z_a &= \kappa_1 a_z \delta X_n + \kappa_2 b_z \delta Y_n + \kappa_3 c_z \delta Z_n, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

так как коэффициенты a_x, b_x, c_x и т. д. для данной точки P — величины постоянные.

Наблюдаемые же вариации в аномальном поле, очевидно, будут представлять собою сумму вариаций нормального и аномального полей, т. е.

$$\delta X = \delta X_n + \delta X_a; \quad \delta Y = \delta Y_n + \delta Y_a; \quad \delta Z = \delta Z_n + \delta Z_a$$

или

$$\left. \begin{aligned} \delta X &= (1 + \kappa_1 a_x) \delta X_n + \kappa_2 b_x \delta Y_n + \kappa_3 c_x \delta Z_n; \\ \delta Y &= \kappa_1 a_y \delta X_n + (1 + \kappa_2 b_y) \delta Y_n + \kappa_3 c_y \delta Z_n; \\ \delta Z &= \kappa_1 a_z \delta X_n + \kappa_2 b_z \delta Y_n + (1 + \kappa_3 c_z) \delta Z_n. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Уравнения (9) показывают, что вариации в аномальном поле являются линейными функциями вариаций нормального поля, причем вариация каждого элемента является функцией вариаций трех элементов нормального поля. Далее, так как коэффициенты a, b и c и т. д. представляют собою функции координат точки P , то вариации в различных точках аномалии будут иметь совершенно различную величину и харак-

тер. Но, как показывают уравнения (8), каждая из вариаций δX_a , δY_a должна быть пропорциональной магнитной восприимчивости χ залегающей породы.

Определяя вариации $\delta \vec{H}_a$ в аномальном поле и вариации $\delta \vec{H}_n$ в нормальном для трех различных моментов времени и подставляя наблюдаемые значения в уравнения (8), получим систему девяти уравнений. Решив эти уравнения, можем найти девять неизвестных коэффициентов a , b , c и т. д. для данной точки P . При большем числе наблюдений получится n уравнений с девятью неизвестными, которые можно решить по способу наименьших квадратов.

Зная коэффициенты a_x , b_x , и т. д., мы можем проследить весь характер вариаций в данной точке, — например, по суточному ходу нормального поля найти суточный ход в аномальном поле.

Уравнения (7) и (8) значительно упрощаются, если рассматривать плоскую задачу, т. е. предполагать, что залежь имеет бесконечное простираие по одному из направлений. Направив ось x -ов по этому направлению, мы получим уравнения (7) независимыми от координаты x . Поэтому те из коэффициентов a , b и c , которые имеют множителем x или произведение $dydz$, сделаются равными нулю, т. е.

$$a_x = 0; b_x = 0; c_x = 0; a_y = 0 \text{ и } a_z = 0,$$

и уравнения (7) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} X'_0 &= 0; \\ Y'_0 &= \kappa_2 b_y Y'_n + \kappa_3 c_y Z'_n + X'_r; \\ Z'_0 &= \kappa_2 b_z Y'_n + \kappa_3 c_z Z'_n + Z'_r; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

и соответственно уравнения (8):

$$\left. \begin{aligned} \delta X'_0 &= 0; \\ \delta Y'_0 &= \kappa_2 b_y \delta Y'_n + \kappa_3 c_y \delta Z'_n; \\ \delta Z'_0 &= \kappa_2 b_z \delta Y'_n + \kappa_3 c_z \delta Z'_n. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

При этом необходимо иметь в виду, что в уравнениях (10) и (11) составляющие как нормального вектора X'_n , Y'_n , Z'_n , так и вектора вариаций $\delta X'_n$, $\delta Y'_n$ и $\delta Z'_n$ отнесены к осям координат, одна из которых, ось X -ов, имеет направление, совпадающее с направлением простираия аномалии.

Если же вариаций нормального вектора даны в другой системе координат, то, обозначая угол между направлением оси аномалии и осью X этой системы через α , будем иметь:

$$\begin{aligned} \delta X'_n &= \delta X_n \cos \alpha + \delta Y_n \sin \alpha; \\ \delta Y'_n &= \delta Y_n \cos \alpha + \delta X_n \sin \alpha; \\ \delta Z'_n &= \delta Z_n. \end{aligned}$$

Подставляя эти значения в уравнения (11), получим:

$$\left. \begin{aligned} \delta X'_n &= 0; \\ \delta Y'_n &= \kappa_2 b_y \sin \alpha \delta X_n + \kappa_2 b_y \cos \alpha \delta Y_n + \kappa_3 c_y \delta Z_n; \\ \delta Z'_n &= \kappa_2 b_z \sin \alpha \delta X_n + \kappa_2 b_z \cos \alpha \delta Y_n + \kappa_3 c_z \delta Z_n. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) показывают, что аномальная вариация в направлении простираия аномалии равна нулю, и, согласно уравнениям (9), общая вариация в этом направлении будет равна нормальной вариации.

Рассмотрим частный случай, когда аномалия вызывается породой, имеющей форму бесконечно длинной прямоугольной призмы и залегающей одним из своих ребер параллельно земной поверхности.

Направим ось X -ов параллельно верхней грани так, чтобы она проходила через точку O (рис. 1). Поперечные размеры бесконечной призмы пусть будут $2a$ и $2b$.

В таком случае коэффициенты b_y, c_y, b_z и c_z для точки P уравнений (11) выразятся,

$$b_y = \int_{z=z_0}^{z_0+b} \int_{x=-\infty}^{\infty} \frac{y dx dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}};$$

$$b_z = \int_{z=z_0}^{z_0+b} \int_{x=-\infty}^{\infty} \frac{z dx dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}};$$

$$c_y = \int_{y=y_0-a}^{y_0+a} \int_{x=-\infty}^{\infty} \frac{y dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}};$$

$$c_z = \int_{y=y_0-a}^{y_0+a} \int_{x=-\infty}^{\infty} \frac{z dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}};$$

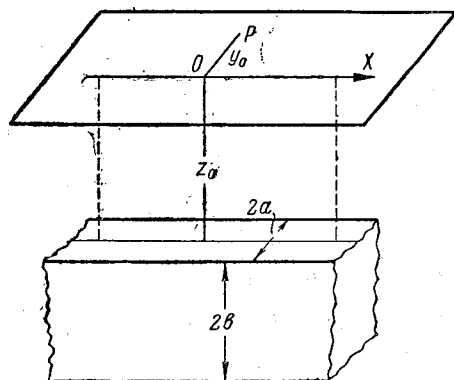


Рис. 1.

или

$$b_y = \int_{y_0-a}^{y_0+a} A x dz; \quad b_z = \int_{y_0-a}^{y_0+a} A z dz;$$

$$c_y = \int_{y_0-a}^{y_0+a} A y dy; \quad c_z = \int_{y_0-a}^{y_0+a} A z dy;$$

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}.$$

Интегрирование функций A производится легко, подстановкой $x = \alpha \operatorname{tg} \theta$; $\alpha = \sqrt{y^2 + z^2}$. Действительно, заменяя переменную x переменной θ , будем иметь:

$$A = \frac{1}{\alpha^2} \int_{x=-\infty}^{\infty} \frac{d\theta}{\cos^2 \theta (1 + \operatorname{tg}^2 \theta)^3} = \frac{1}{\alpha^2} \int_{x=-\infty}^{\infty} \cos \theta d\theta.$$

Так как $\cos \theta$ — функция четная и при $x=0$ $\theta=0$, а при $x=\infty$ $\theta = \frac{\pi}{2}$, то

$$A = \frac{2}{\alpha^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta = \frac{2}{\alpha^2} \sin \theta \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\alpha^2}$$

или

$$A = \frac{2}{y^2 + z^2}.$$

Следовательно

$$b_y = 2y \int_{z_0}^{z_0+b} \frac{dz}{y^2 + z^2}; \quad b_z = 2 \int_{z_0}^{z_0+b} \frac{z dz}{y^2 + z^2};$$

$$c_y = 2 \int_{y_0-a}^{y_0+a} \frac{y dy}{y^2 + z^2}; \quad c_z = 2z \int_{y_0-a}^{y_0+a} \frac{dy}{y^2 + z^2}.$$

Интегрируя получим:

$$b_y = 2x \left| \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{z}{y} \right|_{z_0}^{z_0+b}; \quad b_z = x \left| \lg(y^2 + z^2) \right|_{z_0}^{z_0+b};$$

$$c_y = x \left| \lg(y^2 + z^2) \right|_{y_0-a}^{y_0+a}; \quad c_z = 2x \left| \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y}{z} \right|_{y_0-a}^{y_0+a}.$$

или, принимая во внимание формулы для разности арктангенсов,

$$b_y = 2x \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{yb}{y^2 + z_0(z_0 + b)}; \quad b_z = x \lg \frac{y^2 + (z_0 + b)^2}{y^2 + z_0^2};$$

$$c_y = x \lg \frac{(y_0 + a)^2 + z^2}{(y_0 - a)^2 + z^2}; \quad c_z = 2x \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2az}{z^2 + (y_0^2 - a^2)}.$$

Так как интегрирование выражений (6) должно быть произведено по всей поверхности призмы, т. е. по верхней и нижней и по двум боковым граням, то в полученных формулах для коэффициентов b и c переменную координату y надо заменить координатами $y_0 - a$ и $y_0 + a$, соответствующими боковым граням, и координату z координатами z_0 и $z_0 + b$, соответствующими верхней и нижней грани. Таким образом окончательные значения для коэффициентов получаются в следующей форме:

$$b_y = 2x \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{(y_0 - a)b}{(y_0 - a)^2 + z_0(z_0 + b)} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{(y_0 + a)b}{(y_0 + a)^2 + z_0(z_0 + b)} \right];$$

$$b_z = x \left[\ln \frac{(y_0 - a)^2 + (z_0 + b)^2}{(y_0 - a)^2 + z_0^2} - \ln \frac{(y_0 + a)^2 + (z_0 + b)^2}{(y_0 + a)^2 + z_0^2} \right];$$

$$c_y = x \left[\ln \frac{(y_0 + a)^2 + z_0^2}{(y_0 - a)^2 + z_0^2} - \ln \frac{(y_0 + a)^2 + (z_0 + b)^2}{(y_0 - a)^2 + (z_0 + b)^2} \right];$$

$$c_z = 2x \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2az_0}{z_0^2 + (y_0^2 - a^2)} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2a(z_0 + b)}{(z_0 + b)^2 + (y_0^2 - a^2)} \right].$$

Знак минус между $\operatorname{arc} \operatorname{tg}$ и $\lg$ взят потому, что противоположные грани создают поля прямо противоположного направления.

Подставляя эти значения в уравнения (12), получим значения составляющих аномального вектора вариаций, вызываемого индукционным действием призмы.

Положим, что точка наблюдений расположена над центром аномалии, т. е. когда $y = 0$. В таком случае

$$\left. \begin{aligned} b_z &= c_y = 0; \\ b_y &= -4x \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{ab}{a^2 + z_0(z_0 + b)}; \\ b_z &= 2x \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2az_0}{z_0^2 + a^2} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2a(z_0 + b)}{(z_0 + b)^2 + a^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

и, согласно уравнениям (11),

$$\left. \begin{aligned} \delta X'_0 &= 0; \\ \delta Y'_0 &= -4x \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{al}{a^2 + z_0(z_0 + b)} \delta Y_n; \\ \delta Z'_0 &= 2x \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2az_0}{z_0^2 + a^2} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2a(z_0 + b)}{(z_0 + b)^2 + a^2} \right] \delta Z_n, \end{aligned} \right\}$$

т. е. вариации над центром аномалии пропорциональны нормальным вариациям.

Если нижний полюс находится очень глубоко, т. е. $b = \infty$, то предыдущие выражения напишутся:

$$\left. \begin{aligned} \delta Y_0' &= -4 \kappa_2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{a}{z_0} \delta Y_n'; \\ \delta Z_0' &= 2 \kappa_3 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2az_0}{z_0^2 + a^2} \delta Z_n'. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Восприимчивость породы в вертикальном направлении κ_3 можно считать равной истинной восприимчивости, которая для магнетита не превосходит 0,1 GGS.

Восприимчивость в поперечном направлении, ввиду относительно малых размеров породы в этом направлении, можно принять равной восприимчивости бесконечно тонкой пластины, коэффициент размагничивания которой $N = 4\pi$, и вычислить по формуле:

$$\kappa_2 = \frac{\kappa}{1 + 4\pi \kappa}$$

или

$$\kappa_2 = \frac{0,1}{H 1,25} = \frac{0,1}{2,25} = 0,045.$$

Для Курской аномалии ширина хребта $2a$ по данным бурения составляет около 100 м, а глубина залегания доходит до 100 м, т. е.

$$2a = 100 \text{ м}; Z_0 = 100 \text{ м}.$$

Подставляя эти значения в уравнения (14), получим величины аномальной вариации над центром аномалии.

$$\delta Y_0' = -0,18 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{50}{100} \delta Y_n' = -0,18 \operatorname{arc} \operatorname{tg} 0,5 \delta Y_n';$$

$$\delta Z_0' = 0,2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{100 \cdot 500}{100^2 + 50^2} \delta Z_n' = 0,2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} 0,8 \delta Z_n',$$

или, выражая $\operatorname{arc} \operatorname{tg}$ в числовой мере,

$$\delta Y_0' = -0,18 \cdot 0,46 \delta Y_n' = -0,083 \delta Y_n';$$

$$\delta Z_0' = 0,2 \cdot 0,68 \delta Z_n' = 0,14 \delta Z_n', \quad (15)$$

т. е. аномальная вариация над центром Курской аномалии должна составлять, примерно, десятую часть нормальной вариации.

Так как значения коэффициентов a , b , c , остаются теми же самыми, если мы от вариаций переходим к величине аномального вектора, то, согласно уравнениям (14), можно написать:

$$\left. \begin{aligned} Y_a &= -4 \kappa_2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{a}{z_0} Y_n; \\ Z_a &= 2 \kappa_3 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2az_0}{z_0^2 + a^2} Z_n. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Разделив почленно уравнения (14) и (16), будем иметь:

$$\frac{\delta Y_0'}{\delta Y_n} = \frac{Y_a}{Y_n}; \quad \frac{\delta Z_0'}{\delta Z_n} = \frac{Z_a}{Z_n},$$

т. е. отношение аномальной вариации к нормальной под центром аномалии равно отношению соответствующей аномальной составляющей, вызванной индукционным действием земного поля, и нормальной, или, иначе, аномальная вариация во столько

раз больше или меньше нормальной, во сколько аномальная составляющая больше или меньше нормальной.

Для Курской аномалии $\frac{Z_a}{Z_n} \sim 4$, и поэтому если бы Курская аномалия была вызвана исключительно намагничиванием породы, вызванным индукционным действием земного поля, то и отношение вариаций аномальной и нормальной было бы того же порядка. Между тем из уравнений (15) это отношение получается порядка одной десятой, что ясно указывает на то, что главной причиной Курской аномалии должен быть собственный остаточный магнетизм породы. Поэтому опыты над исследованием вариаций в Курской аномалии имеют еще и то решающее значение, что они дадут окончательный ответ о том, намагничена ли порода земным полем или же она имеет собственное остаточное намагничение.

Из уравнений же (9) вытекает, что солнечно-суточный и лунно-суточный ход элементов земного магнетизма в аномальном районе должен быть отличным от суточного хода в нормальном. Действительно, если вариации δX_n , δY_n и δZ_n представляют собой периодические функции вида:

$$\delta X_n = \Sigma \Delta X_k \sin(\omega k t + \varphi_k);$$

$$\delta Y_n = \Sigma \Delta Y_k \sin(\omega k t + \psi_k);$$

$$\delta Z_n = \Sigma \Delta Z_k \sin(\omega k t + \xi_k),$$

то, подставляя эти значения в уравнения (9), будем иметь:

$$\begin{aligned} \delta X_n = & (1 + a_k) \Sigma \Delta X_k \sin(\omega k t + \varphi_k) + \\ & + b_k \Sigma \Delta Y_k \sin(\omega k t + \psi_k) + \\ & + c_k \Sigma \Delta Z_k \sin(\omega k t + \xi_k) \end{aligned}$$

и т. д.

По правилам сложения тригонометрических функций сумма трех тригонометрических рядов будет представлять тригонометрический же ряд с теми же периодами, но с различными амплитудами и фазами, т. е.

$$\delta X = \Sigma \Delta X'_k \sin(\omega k t + \theta_k)$$

и т. д.

Это выражение, представляющее суточный ход одного из элементов в аномальном поле, совершенно отлично от выражений (13), представляющих суточный ход в нормальном поле.

§ 2. Результаты наблюдений

Для проверки теоретических выводов предыдущего параграфа на одном из участков Курской магнитной аномалии, около с. Долгая Поляна, были установлены две вариационные станции. Одна из них станция № 1 была построена на максимуме вертикальной составляющей, величина которого в этом районе составляет $Z_m = 1,8$ CGS, другая же станция № 2 — на максимуме горизонтальной составляющей, равно $H_m = 0,7$ CGS.

Приборы были установлены таким образом, что давали записи вариаций северной составляющей (δX), восточной составляющей (δY) и вертикальной составляющей (δZ), т. е. один из приборов серии вариометров был установлен по меридиану, другой по параллели. Необходимость такой установки приборов в аномальном районе была установлена теоретически Н. В. Розе и Б. М. Яновским в работе, помещенной в № 1 „Информационного сборника“. В этой работе было доказано, что при обычной установке вариометров по магнитному меридиану (вариации D) и направлению, перпендикулярному к нему (вариации H), в аномальном поле должны получиться записи одновременно вариаций горизонтальной составляющей и склонения, в особенности там, где склонение сильно отличается от нормального значения. Для обоих

пунктов, где были установлены станции, склонение составляло 30° Е, тогда как нормальное его значение для этого района порядка $5-6^\circ$ Е.

Установка по меридиану производилась буссолью с диоптрами. После определения склонения по солнцу, стрелка буссоли устанавливалась на деление, соответствовавшее величине магнитного склонения, что в свою очередь соответствовало направлению плоскости диоптров истинного меридиана.

Отметив штрихом это направление на мраморной плите, на которой должны были установлены приборы, можно было поставить на-глаз плоскости колец Гельмгольца вариометров по направлению штриха и по направлению, перпендикулярному к нему. Далее, пропуская ток через кольца, кручением нити добивались того, чтобы магниты не отклонялись от своего положения равновесия под действием этого тока, что указывало на совпадение магнитной оси магнитов с осью кручения, или, иначе, на совпадение с плоскостью истинного меридиана или параллели.

При таком способе погрешности в установке магнита по меридиану не превышали $\pm 1^\circ$, что вызывало погрешность в регистрации соответствующей компоненты вектора вариации, не превосходящей $1/60$ его величины. Действительно, составляющие δX и δY вектора вариации равны:

$$\delta X = \delta H \cos \beta;$$

$$\delta Y = \delta H \sin \beta,$$

где β — углы между направлением вектора δH и экваториальной плоскостью магнита; отсюда, дифференцируя оба эти выражения, получаем:

$$\Delta \delta X = -\delta X \sin \beta \Delta \beta = -\delta Y \Delta \beta;$$

$$\Delta \delta Y = \delta Y \cos \beta \Delta \beta = \delta X \Delta \beta,$$

т. е. погрешность в определении вариаций δX и δY составляет около $1/60$ их величин, так как $\Delta \beta = \pm 1^\circ$.

Приборами для записи вариации на станции № 1 служили вариометры системы Лакура и на станции № 2 — вариометры системы Б. М. Яновского. Обе системы принципиально отличаются одна от другой лишь в устройстве вариометров Z (вертикальной составляющей). В системе Лакура Z -вариометр устроен на принципе ллойдовых весов, а в системе Яновского — на принципе Ламона (индукция в мягком железе). Расстояние между вариометрами и барабаном регистрирующей части было 1 м.

О величине цены деления, с которой производилась запись вариаций как в аномальном поле, так и в нормальном (Нижедевицк), можно судить по тем данным, которые приведены здесь в таблице.

Большая величина цены деления вариометров на станциях № 1 и № 2 по сравнению с величиной цены деления в Нижедевицке объясняется наличием высоких значений компонент полного вектора $\vec{H}$ — аномального плюс нормального. Из теории вариационных приборов следует, что цена деления ϵ вариометров X и Y выражается следующими простыми формулами:

$$\epsilon_x = \frac{Y + \frac{C}{M}}{2L}; \quad \epsilon_y = \frac{X + \frac{C}{M}}{2L},$$

где X и Y — компоненты полного вектора $\vec{H}$; C — кручение нити; M — магнитный момент подвешенного магнита и L — расстояние от магнита до барабана. Из этих фор-

Название обсерватории	Цена деления, выраженная в гаммах на 1 мм		
	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
Станция № 1 . .	8,4	14,3	15,7
Станция № 2 . .	4,1	7,7	16,0
Нижедевицк . .	4,23	5,14	8,37

мул видно, что для уменьшения величины ϵ при неизменном значении L необходимо или скомпенсировать X и Y постоянным полем, или же, установив направление магнитного момента противоположно направлению X и Y , подобрать толщину нитей таким образом, чтобы разности $Y - \frac{C}{M}$ и $X - \frac{C}{M}$ были наименьшими.

При установке магнитов по направлению X и Y и при отсутствии компенсирующего поля цена деления для станции № 1 должна была бы быть не менее следующих значений:

$$\epsilon_x \geq \frac{y}{2L} = \frac{12\,000}{2\,000} = 6 \text{ } \gamma \text{ на } 1 \text{ мм}; \quad \epsilon_y \geq \frac{x}{2L} = \frac{20\,000}{2\,000} = 10 \text{ } \gamma \text{ на } 1 \text{ мм},$$

а для станции № 2

$$\epsilon_x \geq \frac{35\,000}{2\,000} = 17 \text{ } \gamma \text{ на } 1 \text{ мм}; \quad \epsilon_y \geq \frac{56\,000}{2\,000} = 28 \text{ } \gamma \text{ на } 1 \text{ мм},$$

так как на станции № 1 $X = 20\,000 \gamma$ и $Y = 12\,000 \gamma$ и на станции № 2 $X = 56\,000 \gamma$ и $Y = 35\,000 \gamma$.

Система Лакура не имеет компенсирующих магнитов, поэтому единственная возможность уменьшения ϵ была подбор нитей. Ввиду отсутствия подходящих диаметров нитей, цену делений у системы Лакура снизить не удалось. Система Яновского допускает компенсацию внешнего поля при помощи постоянных магнитов, вследствие чего цена делений здесь значительно ниже, чем у системы Лакура. Дальнейшее же снижение не удалось вследствие недостаточной величины магнитных моментов компенсирующих магнитов.

Таблица 1

Среднесуточный ход элементов земного магнетизма за сентябрь 1936 г. в области Курской аномалии

Время по Гринвичу	ΔX в гаммах			ΔY в гаммах			ΔZ в гаммах		
	Нижне- девицк	№ 1	№ 2	Нижне- девицк	№ 1	№ 2	Нижне- девицк	№ 1	№ 2
0-1	8	10	16	6	6	8	0	—	0
1-2	6	11	16	7	9	9	-1	—	-1
2-3	6	10	16	9	10	11	0	—	-1
3-4	5	8	17	14	11	15	0	—	2
4-5	1	7	13	20	16	20	5	—	3
5-6	-10	-1	-4	26	24	23	12	—	16
6-7	-20	-15	-24	26	23	24	6	—	12
7-8	-27	-23	-29	17	14	17	-1	—	2
8-9	-22	-26	-36	0	1	-1	-11	—	-8
9-10	-15	-28	-25	-18	-17	-20	-17	—	-12
10-11	-7	-10	-17	-28	-29	-31	-22	—	-9
11-12	1	-2	-6	-31	-33	-30	-11	—	-5
12-13	4	-4	-5	-26	-29	-27	-5	—	-5
13-14	4	-3	-2	-19	-23	-20	0	—	3
14-15	1	4	-1	-10	-13	-9	6	—	5
15-16	2	2	2	-5	-3	-5	7	—	3
16-17	2	5	4	-2	-1	-2	5	—	4
17-18	5	4	5	1	3	-2	5	—	4
18-19	7	5	6	2	7	1	6	—	6
19-20	7	7	10	3	6	2	5	—	2
20-21	9	8	10	4	4	2	6	—	2
21-22	10	9	14	4	4	3	3	—	1
22-23	10	10	17	5	6	5	3	—	-1
23-24	10	11	18	6	6	7	3	—	0

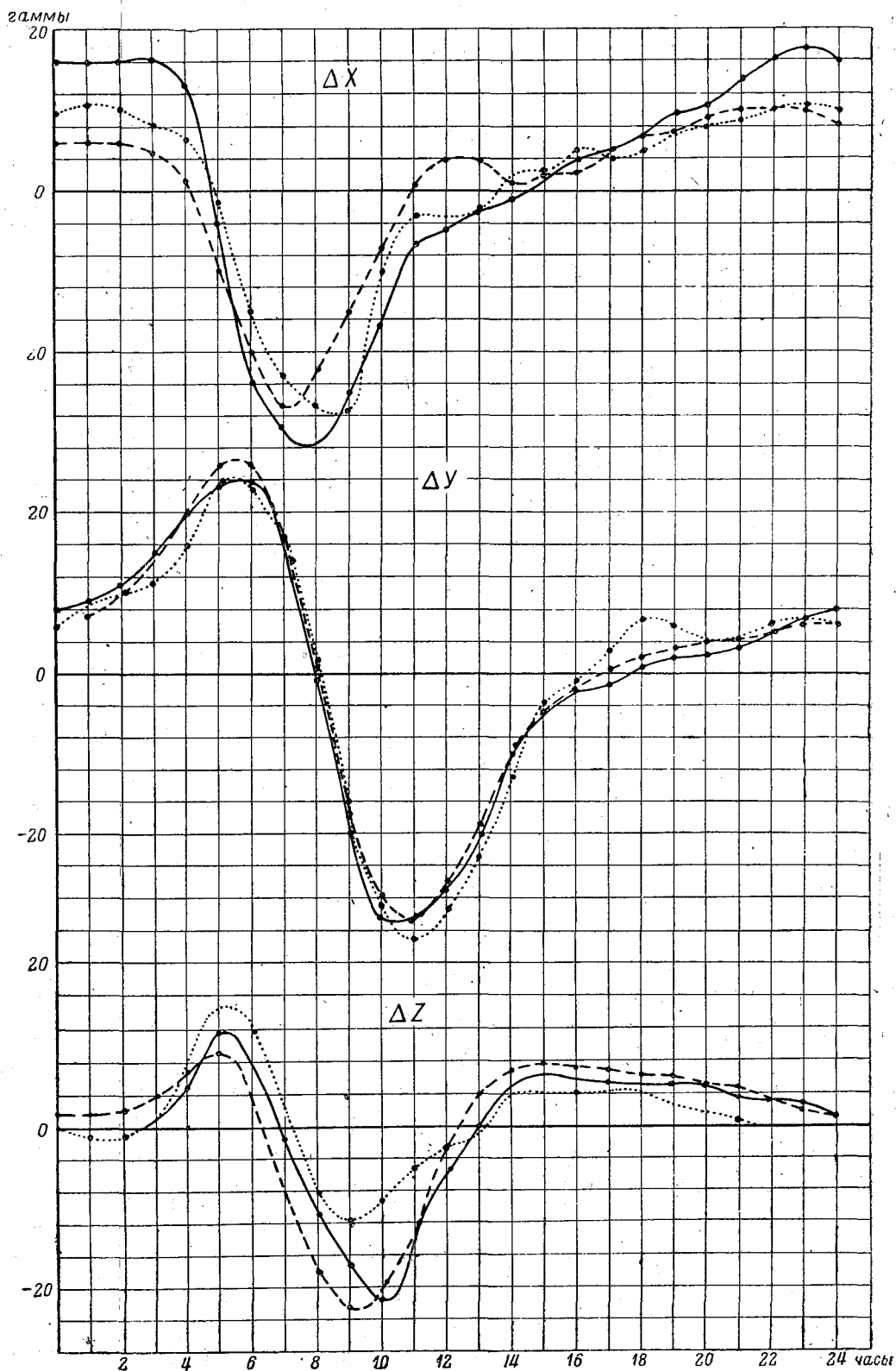


Рис. 2.

--- станция Нижнедевицк; станция № 1, — станция № 2.

Цена делений всех вариометров определялась электрическим методом, т. е. отклонением магнитов полей катушек Гельмгольца, постоянная которых была известна.

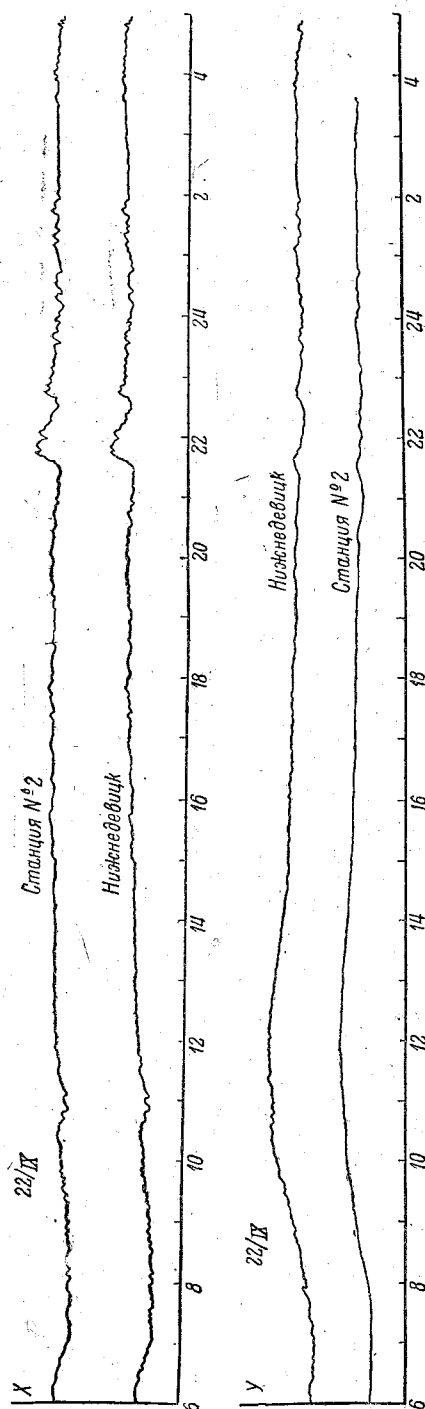


Рис. 3.

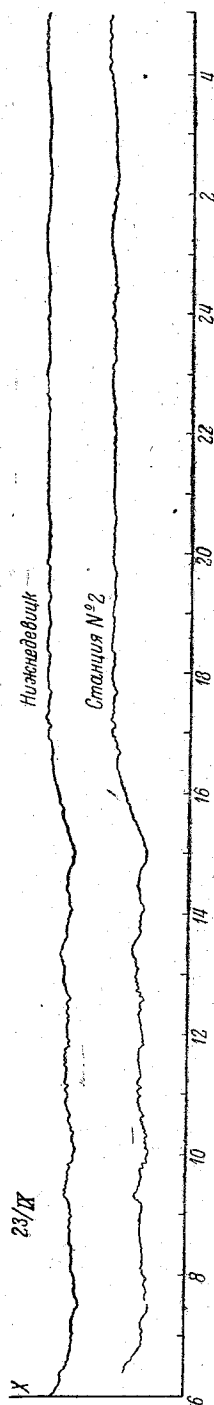


Рис. 4а.

Записи вариометров за сентябрь были обработаны по обычному методу, применяемому во всех обсерваториях, т. е. за каждый часовой промежуток времени сни-

малась с ленты средняя ордината и выводился средний суточный ход за месяц в отклонениях от среднемесячного значения. При выводе среднесуточного хода учитывались все изменения в базисных значениях вариометров, вызванные случайными перестановками приборов. Самопроизвольного смещения базисных значений не наблюдалось, и поэтому при обработке они не принимались во внимание. Точно так же не принимались во внимание температурные изменения приборов ввиду того, что температура помещений обеих станций в течение целого месяца уменьшилась всего лишь на 2° . В течение же суток колебания составляли десятые доли градуса.

В табл. 1 даны результаты обработки, выраженные в отклонениях от среднемесячного значения для каждого часового промежутка суток для обеих станций и для сопоставления для обсерватории в Нижнедевицке. На рис. 2 представлены те же результаты графически.

Данные табл. 1 и кривые на рис. 2 показывают, что вариации в аномальном поле одного порядка с вариациями в нормальном. Имеются некоторые расхождения в амплитудах у северной составляющей X и вертикальной составляющей Z , фаза же у всех компонентов одинакова. Особенно хорошо согласуются вариации восточной составляющей, где и фаза и амплитуда одинаковы, расхождения же могут быть отнесены к ошибкам наблюдения.

На рис. 3, 4а и 4б приведены копии записей вариометров в аномальном и нормальном полях во время магнитных возмущений. Кривые эти показывают, что вариации как в нормальном, так и аномальном поле при данной чувствительности приборов почти в точности совпадают, расхождения лежат в пределах ошибок наблюдений.

В теоретической части было указано, что в Курской аномалии расхождения вариации могут отличаться от вариаций в нормальном поле не более чем на 10% . Так как максимальная амплитуда в вариациях X и Y во время магнитных возмущений в сентябре не превышала $50-60 \gamma$, то разница могла быть только порядка $5-6 \gamma$. При той чувствительности, которая была установлена у приборов, заметить такие расхождения не представлялось возможным. Для этого потребовалось бы установить приборы в нормальном и аномальном поле с чувствительностью, по крайней мере раз в пять-десять большей, и наблюдать вариации во время сильных возмущений.

Таким образом результаты работ экспедиции и теоретические выводы с несомненностью доказывают, что причина Курской аномалии заключается, главным образом, в наличии остаточного намагничивания пород (магнетитовых кварцитов), залегающих в этой области. Вопрос же о происхождении остаточного намагничивания до настоящего времени остается открытым и требует своего разрешения совершенно иными методами, хотя попытки объяснения в этом направлении и имеются (Заборовский, Кенигсбергер), — намагничение в момент охлаждения породы от точки Кюри при наличии земного поля, — однако окончательного решения все еще не получено.

В заключение на рис. 5 представлены кривые, показывающие среднесуточный ход за сентябрь склонения и горизонтальной составляющей в нормальном и аномальном полях. Кривые для нормального поля получены непосредственно из наблюдаемых значений Нижнедевицкой обсер-

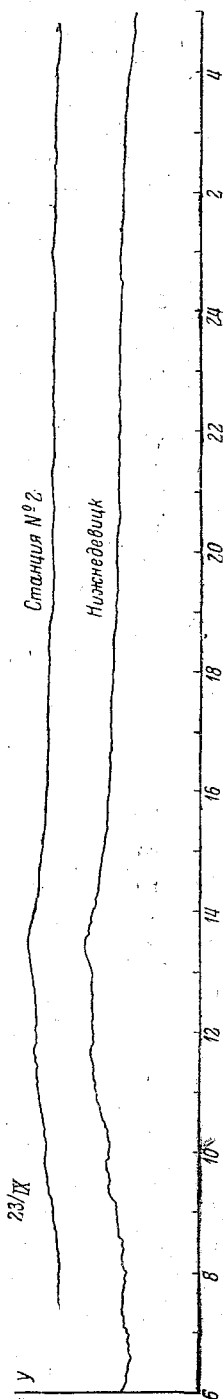


Рис. 4б.

ватории, для аномального же поля станций № 1 и № 2 получены путем вычисления по формулам:

$$\delta D' = \frac{\cos D}{H \sin 1'} \delta Y - \frac{\sin D}{H \sin 1'},$$

где для станции № 1 принято $D = 30^\circ$ и $H = 2500 \gamma$, а для станции № 2 $D = 30^\circ$ и $H = 70\,000 \gamma$. Как видим, суточный ход склонения и горизонтальной составляющей

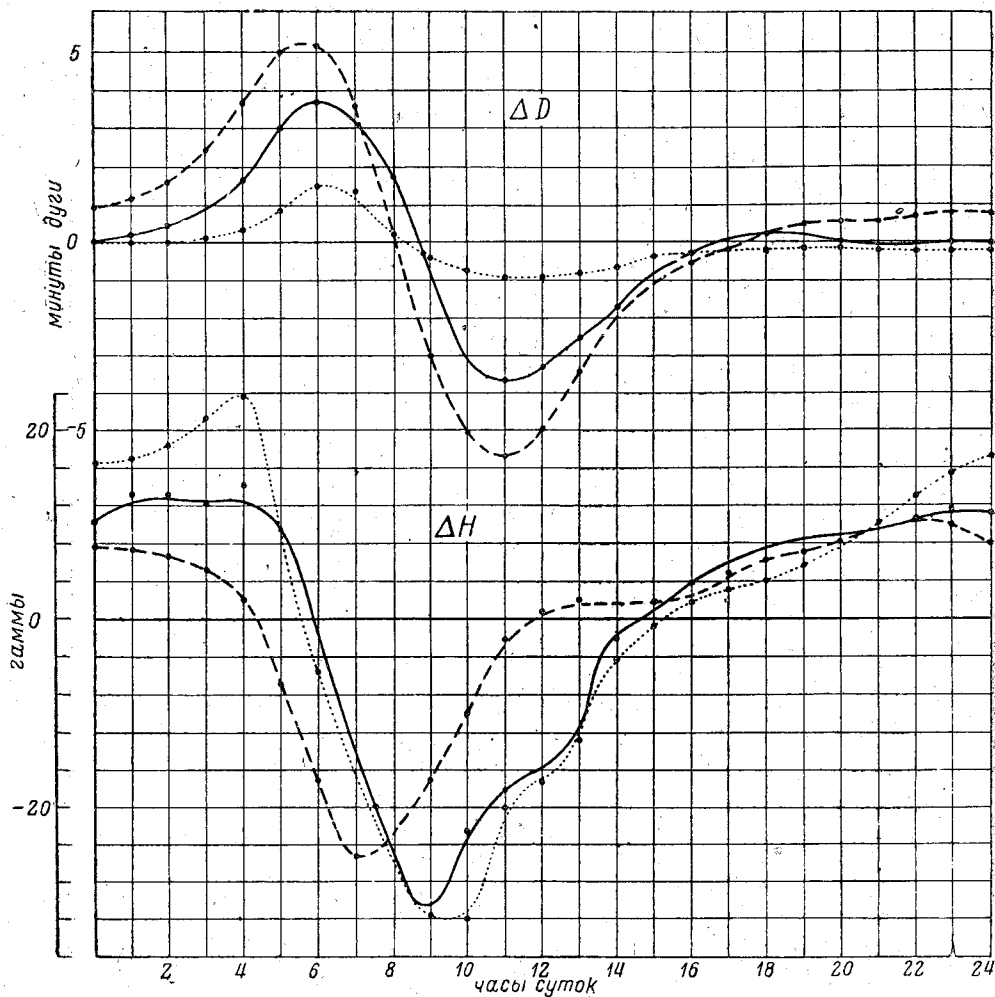


Рис. 5.

— — — станция Нижнедевицк; — станция № 1; станция № 2.

в аномальном поле совершенно отличны от суточного хода в нормальном, и разница будет тем значительнее, чем больше величина склонения D и горизонтальной составляющей H . Причина этого явления теоретически подробно, как было указано выше, рассмотрена в работе Розе и Яновского.

VARIATIONS IN AN ANOMALOUS FIELD

By B. M. Yanovsky

Summary

Observations on the magnetic variations in an anomalous field enable to solve the question of a given anomaly being caused by the residual magnetization of the rocks, or by the inductive effect of the terrestrial field.

The theory of variations in an anomalous field, expounded in the paper, reveals the dependence (9) of the observed variations δX , δY , δZ of any element from those of a normal field where δX_n , δY_n and δZ_n are the variations components of the normal field, and the coefficients x_1 , x_2 and x_3 depend on the coordinates of the point of observation and the sizes, form and magnetic properties of the rocks causing the anomaly.

The theoretical calculation by these formulae for the anomaly of Kursk shows that the difference of the variations in the district of the Kursk anomaly from normal variations cannot exceed 10%.

The observations taken at one of the heights of the Kursk anomaly wholly confirm this theoretical assumption.

Fig. 2 gives the mean diurnal course of the elements X and Y for September at two stations in an anomalous district of the Nizhnedevitskaia Station, which is situated in a normal field.

The curves show an entirely harmonic course and the existing divergencies are within the errors of observation. Therefore, having at our disposal only instruments of insufficient sensitiveness no variations called forth by inductive magnetization could be detected.

For this purpose it would be necessary to take observations with variometers, the sensitiveness of which must be several times higher than of those we at present possess.

The work effected allows to draw the indisputable conclusion that the anomaly of Kursk is caused 90% by the residual magnetization itself, and the difference in the variations of the elements X , Y and Z of magnetism from those in a normal field does not exceed 10%.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕКОВОГО ХОДА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ СССР ДЛЯ ЭПОХИ 1930—1935 ГГ.

В 1931 г., согласно постановлению Совнаркома СССР, Институтом земного магнетизма Главной геофизической обсерватории была начата генеральная магнитная съемка СССР. Для приведения результатов съемки к одной эпохе, а именно к эпохе 1935 г., потребовалось точное знание векового хода магнитных элементов. С этой целью старшими специалистами Бюро генеральной магнитной съемки Н. Е. Малининой и В. П. Орловым и было произведено настоящее исследование векового хода элементов земного магнитного поля СССР за период 1930—1935 гг. Работа была распределена между авторами следующим образом: Н. Е. Малинина изучала район Европейской части Союза, от западных его границ до линии, проходящей через реки Каму и Волгу и через западный берег Каспийского моря, а В. П. Орлов — остальную территорию Союза до Тихого океана.

Для работы были использованы наблюдения магнитных обсерваторий Союза [Слуцк, Кучино, Займище (Казань), Высокая Дубрава (Свердловск), Иркутск, Тбилиси, Ташкент] и ближайших обсерваторий сопредельных стран (Руде Сков, Седдин, Вена, Дехра-дун, Цин-дао, Лукьяпанг, Какиока, Ситка), наблюдения на опорных пунктах, а также наблюдения на ряде повторных пунктов генеральной магнитной съемки СССР.

До 1931 г. количество наблюдений на опорных пунктах было недостаточно, и распределение их на территории СССР неравномерно. Поэтому изучение векового хода представляло значительные трудности и не могло дать достаточно точных результатов. С 1931 г. (с момента организации генеральной магнитной съемки) число наблюдений как на опорных, так и на повторных пунктах резко возросло, что дало возможность вывести вековой ход для пятилетия 1930—1935 гг. с гораздо большей полнотой и точностью, нежели это сделано для эпохи 1925—1930 гг. Но все же и теперь повторных определений далеко не достаточно для полного знания векового хода в СССР. Так, если обжитые районы в этом отношении хорошо освещены, то вся северная часть Союза, а также районы рек Енисея, Амура и район, лежащий к востоку от р. Лены, изучены в отношении векового хода недостаточно.

Данные всех магнитных обсерваторий и тех опорных пунктов, для которых имеется достаточный ряд наблюдений, показывают, что около 1930 г. произошло довольно резкое изменение величины векового хода горизонтальной составляющей, причем это изменение достигает 15—20 γ в год. Примерно к этому же времени приурочены изменения и векового хода наклонения. Но изменения векового хода наклонения, достигающие двух минут в год в районе, близком к Каспийскому морю, по мере удаления от него постепенно сглаживаются. Для иллюстрации изменения векового хода приводим нижеследующие графики (рис. 1).

Это изменение векового хода, наступившее около 1930 г., не позволило при выводе величины годовых изменений за период 1930—1935 гг. использовать наблюдения, произведенные в 1925—1928 гг. даже для тех пунктов, где повторных наблюдений после 1930 г. было недостаточно.

Это обстоятельство еще больше уменьшило число пунктов для северной части Союза и восточной половины Сибири, которыми можно было воспользоваться для вывода векового хода.

Точность наблюдений на отдельных пунктах, включая сюда ошибки наблюдения и приведения к середине года, можно считать для $D \pm 2'$, для $H \pm 10 \gamma$ и для $I \pm 2'$; в отдельных случаях и для пунктов, расположенных в высоких широтах, точность может быть еще ниже. При указанной выше точности наблюдений, как правило, для вывода векового хода были использованы лишь те пункты, для которых промежуток между повторными определениями составлял не менее 3-х лет. В некоторых случаях, если нигде вблизи других повторных пунктов не имелось, приходилось использовать также наблюдения, произведенные не вполне точно на одном и том же месте. В общей сложности для вывода векового хода было принято 256 пунктов.

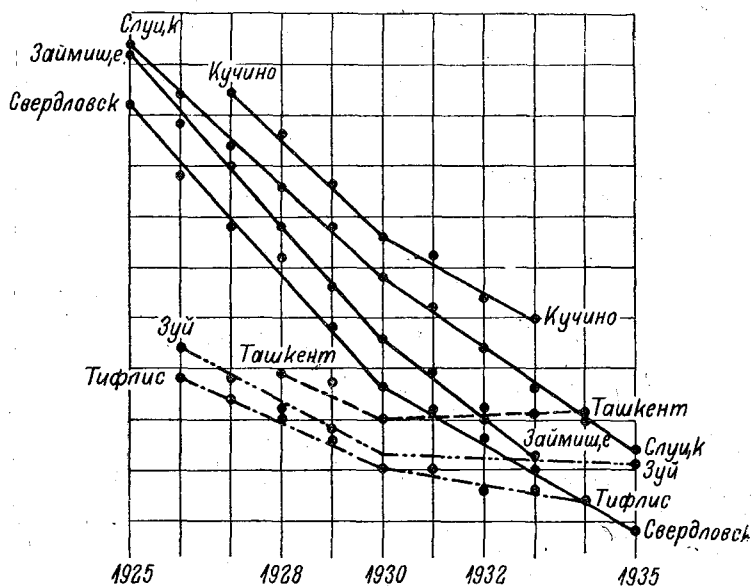


Рис. 1.
Одна клетка = 50 γ .

из которых 138 пунктов приходится на территорию Европейской части и 118 пунктов падают на Азиатскую часть Союза.

Вековой ход D , I , H выводился из непосредственно наблюдаемых величин этих элементов, приведенных предварительно к середине года наблюдения.

Для вывода векового хода X и Y на каждом пункте вычислялись значения X и Y по D и H , приведенным к середине года, и затем подсчитывались годовые изменения ΔX и ΔY .

Принимая во внимание вышеуказанную точность наблюдений D , H и I и полагая, что в среднем вековой ход был получен для промежутка времени не менее четырех лет, можно считать, что вековой ход был выведен для каждого пункта в среднем со следующей точностью:

$$\Delta D = \pm 1'; \Delta I = \pm 1'; \Delta H = \pm 5\gamma; \Delta X = \pm 5\gamma; \Delta Y = \pm 5\gamma.$$

Следует отметить, что для отдельных пунктов точность могла быть значительно ниже, и в этих случаях от использования их приходилось отказываться.

Метод составления карт изопор для различных элементов магнитного поля был не вполне одинаковым. Для непосредственно наблюдавшихся элементов: склонения, наклонения и горизонтальной составляющей система изопор строилась только на

основании нанесенных по координатам на бланк карты значений ΔD , ΔI и ΔH на отдельных пунктах.

Для северной и восточной составляющих системы изопор, построенные на основании значений ΔX и ΔY , вычисленные непосредственно для пунктов наблюдений, были сравнены со значениями ΔX и ΔY , вычисленными по значениям ΔD и ΔH , снятым для равноотстоящих точек с соответствующих карт изопор. Расхождения между изопорами и вычисленными значениями ΔX и ΔY в большинстве случаев не превосходили 3 γ и лишь в некоторых случаях для восточной составляющей достигали в областях, недостаточно освещенных систематическими наблюдениями (север Европейской части Союза ССР), величины 5 γ . На основании этого сравнения карты изопор элементов ΔX и ΔY были прокорректированы, и в частности на карте восточной составляющей ΔY было уточнено положение нулевой изопоры.

Значения ΔZ и ΔT , вычисляемые для каждого пункта отдельно, при нормальной точности $\Delta I = \pm 1'$ и $\Delta H = \pm 5 \gamma$ могли иметь для соседних пунктов расхождения свыше 50 γ , т. е. точность их была недостаточна. Поэтому для карт изопор вертикальной составляющей и полного напряжения значения ΔZ и ΔT были вычислены по системе равноотстоящих точек на основании значений ΔI и ΔH , снятых с соответствующих карт.

В процессе работы обнаружилось, что иногда величины годового изменения элементов геомагнитного поля на одном каком-нибудь пункте или в некоторых случаях на группе их несколько отличаются от изменений на окружающих пунктах. В этом случае можно говорить о наличии меньших по величине местных (как бы гнездовых) изменений, налагающихся на постепенное изменение векового хода для всей территории СССР. Возможно, что эти гнездовые изменения находятся в связи с геологическим строением того или другого ограниченного района.

Оставляя решение вопроса о реальности местных аномалий векового хода для последующих исследований, в настоящей работе для всех элементов геомагнитного поля мы дали системы сглаженных изопор, которые обрисовывают лишь изменения, охватывающие значительные площади.

На карту изопор вертикальной составляющей (рис. 5) кроме линий равного годового изменения нанесены также для сети равноотстоящих точек вектора годовых изменений горизонтальной составляющей.

Кроме карт величины годовых изменений даны также в виде таблиц 1—7.

Хотя значения годовых изменений в таблицах даны для ΔD и ΔI в десятых долях минуты и для остальных элементов в единицах гамм, при пользовании как таблицами, так и картами следует иметь в виду, что общая точность их, как это следует из общей точности использованных наблюдений, а также из величины градиентов векового хода различных элементов, составляет примерно:

$$d\Delta D = \pm 1'; d\Delta I = \pm 0,5'; d\Delta H = \pm 5 \gamma; d\Delta X = \pm 5 \gamma; d\Delta Y = \pm 5 \gamma; \\ d\Delta Z = \pm 20 \gamma; d\Delta T = \pm 20 \gamma$$

с возможным понижением ее в малоосвещенных наблюдениями районах крайнего севера, Монгольской народной республики, Манчжоу-Го и крайних восточных частей Узбекистана и Таджикистана.

При рассмотрении карт изопор отчетливо выявляется как стройность системы изопор по каждому элементу в отдельности, так и соответствие изопор различных элементов друг другу.

На карте изопор ΔI хорошо вырисовывается системой охватывающих изопор „фокус“ максимального годового изменения наклонения, лежащий в районе Каспийского моря. Еще резче этот „фокус“ вырисовывается на картах изопор ΔZ и ΔT .

Величина годовых изменений в „фокусе“ для $\Delta I = \pm 5'$, для $\Delta Z = \pm 120 \gamma$ и для ΔT более 100 γ .

На карте изопор ΔH выявляется „фокус“ максимальных годовых изменений, с центром, лежащим в районе города Куйбышева. Такой же четкий „фокус“ в том же районе вырисовывается и на карте изопор ΔX .

Величина годовых изменений ΔH и ΔX в „фокусе“, примерно, одинакова и составляет —45 γ .

Через „фокус“ ΔZ , ΔT и ΔI в районе Каспийского моря на картах ΔH и ΔX проходят нулевые изопоры.

На карте изопор ΔD через Каспийское море, примерно с SSW на NNO, проходит нулевая изопора. К западу от нее изопоры положительны (восточное склонение растёт). „Фокус“ в пределах СССР на западе нет. К востоку от нулевой изопоры восточное склонение убывает (изопоры отрицательны). Вполне замкнутого изопорами ΔD „фокуса“ нет, но таковой четко намечается в Полярном море, к северу от устья р. Лены, где годовое изменение больше —11'. Обращают на себя внимание большие величины годового изменения склонения (отрицательные) по всему северу к востоку от р. Лены до острова Врангеля и дальше. На карте изопор ΔY нулевая изопора проходит через остров Вайгач и Каспийское море. К западу от нулевой изопоры ΔY (положительное) быстро возрастает. „Фокуса“ в пределах СССР нет.

К востоку от нулевой изопоры ΔY отрицательно. Значение ΔY достигает—24 γ по линии, идущей с SW на NO и проходящей, примерно, через Иркутск. Далее на восток ΔY по абсолютной величине убывает. Вполне замкнутого „фокуса“ в районе карты нет, но таковой намечается к северу от Чукотского полуострова (в районе острова Врангеля $\Delta Y = -34 \gamma$).

Общая картина такова, что в районе Каспийского моря находится некоторый „центр“ векового хода. В районе этого „центра“ происходят какие-то физические процессы, которые сопровождаются как бы увеличением южных магнитных масс. Можно полагать, что эти процессы происходят на весьма значительной глубине, так как влияние их распространяется на большую часть территории СССР, а именно:

- 1) „фокусы“ ΔI , ΔZ и ΔT лежат в районе этого „центра“, и система охватывающих „фокусы“ изопор распространяется на тысячи километров;
- 2) „фокусы“ ΔH и ΔX смещены к северу от „центра“, примерно, на 2000 км;
- 3) изменения ΔD и ΔY на расстояниях нескольких тысяч километров по своему знаку соответствуют изложенному в двух предыдущих пунктах.

Особенно четко на эту связь векового хода с каспийским „центром“ указывают вектора ΔH , построенные на карте изопор вертикальной составляющей. Но величины векторов ΔH , а иногда и направление их, вместе с изопорами различных элементов указывают на то, что в крайних восточных частях Союза общая картина распределения векового хода действием одного каспийского „центра“ объяснена быть не может („фокус“ ΔY к северу от Чукотского полуострова). Для ее объяснения необходимо принять в расчет и действие двух других „центров“, расположенных в Тихом океане.

Наличие тихоокеанских „центров“ было установлено Фиском,¹ причем положение их для эпохи 1920—1925 гг. определяется, по данным Фиска, следующими координатами:

северный „центр“ $\varphi \approx +45^\circ$, $\lambda \approx +230^\circ$;

южный „центр“ $\varphi \approx 0^\circ$, $\lambda \approx +145^\circ$.

В этих „центрах“ вертикальная составляющая убывает, и действие их противоположно по знаку каспийскому. В самых западных частях территории нашего Союза к действию каспийского „центра“, повидимому, начинает присоединяться действие „центра“ атлантического, но вследствие удаленности последнего действие каспийского „центра“ преобладает.

¹ N. Fisk. Isopors and isoporic movements. Reports and communications to Section of Terrestrial Magnetism International Geodetic and Geophys. Union, Stockholm Assembly. Washington. 1930.

Годовые изменения магнитного склонения (восточное
+ восточное склонение увеличивается, западное уменьшается;

$\varphi \backslash \lambda$	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
70	—	—	—	7,2	7,0	6,6	6,3	6,1	5,9	5,6	5,3	5,0	4,8	4
68	—	—	—	7,1	6,8	6,5	6,2	5,9	5,6	5,3	5,1	4,8	4,6	4
66	—	—	—	7,0	6,7	6,3	6,0	5,7	5,4	5,2	4,9	4,6	4,3	4
64	—	8,0	7,5	7,0	6,7	6,3	5,9	5,6	5,3	5,0	4,7	4,3	4,0	3
62	—	8,0	7,4	7,0	6,7	6,2	5,8	5,5	5,1	4,8	4,5	4,1	3,8	3
60	—	8,0	7,4	6,9	6,5	6,1	5,7	5,3	4,9	4,6	4,2	3,9	3,5	3
58	—	8,0	7,5	6,9	6,5	6,0	5,6	5,1	4,7	4,4	4,0	3,5	3,2	2
56	—	8,0	7,5	6,9	6,5	6,0	5,4	5,0	4,5	4,1	3,7	3,3	2,9	2
54	—	8,0	7,5	6,9	6,4	5,9	5,3	4,8	4,3	3,9	3,4	3,0	2,5	2
52	—	8,0	7,5	6,9	6,4	5,8	5,1	4,7	4,1	3,7	3,2	2,7	2,1	1
50	—	8,0	7,5	7,0	6,3	5,7	5,0	4,5	3,9	3,4	2,9	2,2	1,6	1
48	—	8,0	7,5	7,0	6,2	5,5	4,9	4,3	3,7	3,2	2,6	1,8	1,2	0
46	—	8,0	7,5	7,0	6,2	5,5	4,8	4,2	3,6	3,0	2,2	1,4	0,8	0
44	—	—	—	7,0	6,1	5,4	4,7	4,0	3,3	2,7	1,8	1,0	0,4	-0
42	—	—	—	—	—	5,3	4,6	3,8	3,2	2,4	1,7	0,8	0,1	-0
40	—	—	—	—	—	—	—	3,7	3,1	2,2	1,3	0,6	0,0	-0
38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,0	1,0	0,3	-0,1	-0
36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,0	0,3	-0,2	-0

$\varphi \backslash \lambda$	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108
70	-4,0	-5,0	-5,6	-6,2	-6,7	-7,0	-7,5	-7,9	-8,3	-8,7	-9,0	-9,3	-9,6	-9
68	-4,0	-4,8	-5,3	-5,8	-6,2	-6,6	-7,0	-7,3	-7,7	-8,0	-8,3	-8,6	-8,8	-9
66	-3,9	-4,6	-5,1	-5,5	-5,7	-6,1	-6,5	-6,7	-7,0	-7,3	-7,6	-7,9	-8,1	-8
64	-3,7	-4,3	-4,8	-5,2	-5,4	-5,7	-6,0	-6,2	-6,5	-6,8	-7,0	-7,2	-7,3	-7
62	-3,6	-4,0	-4,4	-4,8	-5,1	-5,3	-5,6	-5,8	-6,0	-6,2	-6,4	-6,5	-6,6	-6
60	-3,5	-3,8	-4,2	-4,4	-4,7	-4,9	-5,1	-5,3	-5,5	-5,6	-5,8	-5,9	-6,0	-6
58	-3,4	-3,7	-3,9	-4,2	-4,4	-4,6	-4,7	-4,8	-4,9	-5,0	-5,2	-5,3	-5,4	-5
56	-3,4	-3,6	-3,8	-3,9	-4,1	-4,2	-4,3	-4,4	-4,5	-4,6	-4,7	-4,7	-4,8	-4
54	-3,4	-3,5	-3,7	-3,8	-3,9	-3,9	-4,0	-4,0	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4,1	-4
52	-3,4	-3,5	-3,6	-3,7	-3,7	-3,8	-3,8	-3,8	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3
50	-3,3	-3,4	-3,5	-3,6	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3,7	-3
48	-3,3	-3,4	-3,5	-3,5	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3
46	-3,2	-3,3	-3,4	-3,4	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,4	-3,4	-3,3	-3,3	-3,3	-3
44	-3,2	-3,3	-3,3	-3,3	-3,3	-3,4	-3,4	-3,3	-3,3	-3,3	-3,2	-3,2	-3,1	-3
42	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,1	-3,1	-3,0	-3,0	-2
40	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,2	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1	-3,0	-3,0	-2,9	-2,7	-2
38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

$\varphi \backslash \lambda$	140	142	144	146	148	150	152	154	156	158	160	162
70	—	—	—	—	—	—	—	—	-10,0	-10,0	-10,0	-10
68	-9,6	-9,5	-9,4	-9,3	-9,3	-9,2	-9,2	-9,1	-9,0	-9,0	-9,0	-9
66	-8,4	-8,3	-8,3	-8,2	-8,2	-8,1	-8,0	-8,0	-8,0	-8,0	-8,0	-8
64	-7,4	-7,4	-7,4	-7,3	-7,3	-7,2	-7,2	-7,1	-7,1	-7,0	-7,0	-7
62	-6,6	-6,5	-6,5	-6,4	-6,4	-6,3	-6,2	-6,2	-6,1	-6,0	-6,0	-6
60	-5,7	-5,6	-5,5	-5,5	-5,4	-5,3	-5,3	-5,2	-5,2	-5,1	-5,0	-5
58	-4,8	-4,8	-4,7	-4,6	-4,6	-4,5	-4,4	-4,4	-4,3	-4,3	-4,3	-4
56	-4,1	-4,0	-3,9	-3,9	-3,8	-3,8	-3,7	-3,7	-3,6	-3,6	-3,5	-3
54	-3,4	-3,4	-3,3	-3,2	-3,2	-3,1	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0	-3,1	-3
52	-2,8	-2,8	-2,7	-2,7	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,6	-2,7	—	—
50	-2,4	-2,3	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,2	-2,3	—	—	—
48	-1,9	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	-1,8	—	—	—	—	—	—
46	-1,5	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	—	—	—	—	—	—	—
44	-1,2	-1,2	-1,2	-1,3	—	—	—	—	—	—	—	—
42	-0,9	-0,9	-0,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40	-0,7	-0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38	-0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36	-0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

— восточное склонение уменьшается, западное увеличивается

52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80
4,2	3,9	3,6	3,2	2,9	2,5	2,1	1,8	1,4	1,0	0,5	—0,1	—1,1	—2,0	—3,0
4,0	3,7	3,4	3,0	2,7	2,4	2,0	1,6	1,1	0,7	0,2	—0,7	—1,6	—2,2	—3,0
3,7	3,3	3,0	2,7	2,4	2,0	1,6	1,3	0,7	0,2	—0,5	—1,2	—2,0	—2,4	—3,0
3,4	3,0	2,7	2,4	2,0	1,6	1,1	0,7	0,1	—0,4	—1,0	—1,7	—2,1	—2,6	—3,0
3,0	2,7	2,4	2,0	1,6	1,1	0,5	0,0	—0,5	—1,0	—1,4	—2,0	—2,4	—2,7	—3,1
2,8	2,4	2,0	1,6	1,1	0,6	0,0	—0,4	—0,9	—1,3	—1,8	—2,2	—2,5	—2,8	—3,1
2,4	2,0	1,5	1,0	0,5	0,0	—0,4	—0,8	—1,2	—1,6	—2,0	—2,4	—2,6	—2,9	—3,2
2,0	1,6	1,0	0,6	0,0	—0,4	—0,8	—1,2	—1,6	—1,9	—2,2	—2,5	—2,8	—3,1	—3,2
1,6	1,0	0,5	0,0	—0,4	—0,8	—1,2	—1,6	—1,9	—2,2	—2,4	—2,8	—3,0	—3,1	—3,2
1,0	0,5	0,0	—0,3	—0,7	—1,0	—1,4	—1,8	—2,1	—2,3	—2,6	—2,8	—3,0	—3,2	—3,3
0,5	0,0	—0,3	—0,6	—1,0	—1,3	—1,7	—2,0	—2,2	—2,5	—2,7	—2,9	—3,1	—3,2	—3,3
0,1	—0,3	—0,6	—0,9	—1,2	—1,5	—1,8	—2,1	—2,3	—2,5	—2,7	—2,9	—3,1	—3,2	—3,2
—0,2	—0,5	—0,8	—1,1	—1,3	—1,7	—2,0	—2,2	—2,4	—2,6	—2,8	—3,0	—3,1	—3,1	—3,2
—0,4	—0,7	—1,0	—1,2	—1,5	—1,8	—2,0	—2,2	—2,4	—2,6	—2,8	—2,9	—3,0	—3,1	—3,2
—0,6	—0,8	—1,2	—1,4	—1,6	—1,9	—2,1	—2,2	—2,4	—2,6	—2,8	—2,9	—3,0	—3,1	—3,1
—0,7	—1,0	—1,3	—1,5	—1,7	—1,9	—2,1	—2,3	—2,4	—2,6	—2,8	—2,9	—3,0	—3,1	—3,1
—0,8	—1,1	—1,3	—1,5	—1,7	—2,0	—2,1	—2,2	—2,4	—2,6	—2,7	—2,9	—3,0	—	—
—1,0	—1,2	—1,4	—1,6	—1,8	—2,0	—2,1	—2,3	—2,4	—2,6	—2,7	—2,9	—3,0	—	—

110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130	132	134	136	138
—10,0	—10,2	—10,5	—10,7	—10,8	—11,0	—11,0	—11,0	—11,0	—11,0	—11,0	—10,9	—10,8	—10,7	—10,5
—9,1	—9,2	—9,5	—9,6	—9,8	—9,9	—10,0	—10,0	—10,0	—10,0	—9,9	—9,8	—9,8	—9,7	—9,7
—8,3	—8,4	—8,5	—8,6	—8,7	—8,7	—8,7	—8,7	—8,7	—8,7	—8,7	—8,7	—8,6	—8,6	—8,5
—7,6	—7,7	—7,7	—7,7	—7,7	—7,7	—7,7	—7,7	—7,7	—7,7	—7,7	—7,6	—7,6	—7,5	—7,5
—6,8	—6,9	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—6,9	—6,9	—6,8	—6,8	—6,7	—6,7	—6,6
—6,2	—6,3	—6,3	—6,3	—6,3	—6,3	—6,2	—6,2	—6,1	—6,1	—6,0	—6,0	—6,0	—5,9	—5,8
—5,4	—5,5	—5,5	—5,5	—5,5	—5,5	—5,5	—5,4	—5,4	—5,3	—5,2	—5,2	—5,1	—5,0	—4,9
—4,8	—4,8	—4,8	—4,8	—4,7	—4,7	—4,7	—4,6	—4,6	—4,5	—4,5	—4,4	—4,3	—4,2	—4,2
—4,1	—4,1	—4,0	—4,0	—4,0	—4,0	—4,0	—3,9	—3,9	—3,8	—3,8	—3,7	—3,7	—3,6	—3,5
—3,8	—3,8	—3,8	—3,7	—3,7	—3,7	—3,6	—3,5	—3,4	—3,4	—3,3	—3,2	—3,1	—3,0	—2,9
—3,6	—3,6	—3,5	—3,4	—3,4	—3,3	—3,3	—3,2	—3,1	—2,9	—2,8	—2,7	—2,6	—2,5	—2,4
—3,4	—3,3	—3,2	—3,2	—3,1	—3,0	—2,9	—2,7	—2,6	—2,5	—2,3	—2,2	—2,1	—2,0	—1,9
—3,2	—3,1	—3,0	—2,9	—2,7	—2,6	—2,4	—2,3	—2,2	—2,0	—1,9	—1,8	—1,7	—1,6	—1,6
—3,0	—2,8	—2,7	—2,5	—2,3	—2,2	—2,0	—1,8	—1,7	—1,6	—1,5	—1,4	—1,3	—1,3	—1,2
—2,7	—2,5	—2,3	—2,1	—1,9	—1,8	—1,6	—1,4	—1,3	—1,2	—1,0	—1,0	—0,9	—0,9	—0,9
—2,4	—2,2	—2,0	—1,8	—1,6	—1,4	—1,2	—1,0	—0,9	—0,8	—0,8	—0,8	—0,7	—0,7	—0,7
—	—	—	—	—	—1,0	—0,9	—0,8	—0,7	—0,7	—0,6	—0,5	—0,5	—0,4	—0,4
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—0,3	—0,3	—0,2	—0,2	—0,2

164	166	168	170	172	174	176	178	180	182	184	186	188	190
—10,0	—9,9	—9,9	—9,9	—9,8	—9,8	—9,8	—9,8	—9,8	—9,8	—9,8	—9,8	—	—
—9,0	—8,9	—8,9	—8,9	—8,9	—9,0	—9,0	—9,0	—9,0	—9,0	—9,0	—9,0	—9,0	—
—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0	—8,0
—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0
—5,9	—5,9	—5,9	—5,9	—5,8	—5,8	—5,8	—5,7	—5,7	—5,7	—5,7	—5,6	—	—
—4,9	—4,9	—4,8	—4,8	—4,8	—4,8	—	—	—	—	—	—	—	—
—4,2	—4,2	—4,2	—4,2	—4,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—3,5	—3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 4

Годовые изменения напряженности земного магнитного поля за период 1930—1935 гг. (в 0,00001 CGS)
Северная составляющая ΔX

φ	λ	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186
70	—	—	29	30	30	30	28	27	25	23	21	19	18	18	17	16	15	15	14	13	12	11	9	6	3	0	3	6	—
68	—	—	30	32	32	31	30	30	28	25	22	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	6	3	0	3	5	—
64	—	29	31	34	35	35	34	32	30	28	25	22	20	19	18	16	14	13	12	11	11	10	7	4	1	0	2	4	5
60	—	28	33	36	38	38	37	35	33	30	27	23	20	18	16	14	12	11	11	10	9	8	5	2	0	2	3	—	—
56	—	26	32	39	42	43	41	38	35	32	28	23	20	16	12	11	10	9	8	7	6	4	2	0	3	—	—	—	—
52	—	21	29	38	42	42	41	38	33	30	25	20	15	11	9	7	6	5	4	4	3	2	0	2	—	—	—	—	—
48	—	15	19	27	32	34	32	29	25	21	16	10	7	5	4	3	2	1	1	1	0	1	—	—	—	—	—	—	—
44	—	—	10	13	16	17	18	15	12	8	4	1	0	1	2	3	3	4	2	1	2	—	—	—	—	—	—	—	—
40	—	—	—	—	1	1	1	0	2	4	5	6	8	9	9	10	10	8	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36	—	—	—	—	—	11	11	11	11	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 5

Годовые изменения напряженности земного магнитного поля за период 1930—1935 гг. (в 0,00001 CGS)
Восточная составляющая ΔY

φ	λ	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186
70		—	20	16	11	7	3	0	4	8	11	15	19	21	22	23	25	26	27	28	28	29	30	31	32	32	33	33	—
68		—	22	17	11	7	3	1	5	9	13	17	20	21	22	23	24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	32	32	—
64		—	25	20	13	8	3	2	7	11	17	20	21	21	22	23	24	25	26	26	27	27	28	28	29	30	30	30	—
60		36	29	22	14	8	2	3	10	15	20	21	22	22	23	23	24	23	24	24	24	24	24	24	25	25	25	—	—
56		40	33	24	15	8	1	6	12	18	20	21	22	23	23	24	23	22	21	21	20	19	20	20	20	20	20	—	—
52		45	38	27	16	7	0	10	15	20	21	22	22	23	24	23	22	21	19	18	17	16	16	17	—	—	—	—	—
48		48	41	30	16	6	4	12	18	20	21	22	23	24	23	22	21	18	16	14	13	13	—	—	—	—	—	—	—
44		—	42	31	16	4	8	14	20	21	22	22	23	24	23	22	18	15	12	10	9	—	—	—	—	—	—	—	—
40		—	—	—	15	2	10	16	20	21	22	23	23	24	22	20	15	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36		—	—	—	—	0	10	17	22	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 6

Годовые изменения напряженности земного магнитного поля за период 1930—1935 гг. (в 0,00001 CGS)

Вертикальная составляющая ΔZ

$\lambda \backslash \varphi$		24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186
70 68 64 60 56 52 48 44 40 36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33	31	29	27	24	21	17	12	8	4	0	-2	-5	-7	-10	-12	-14	-16	-18	-20
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34	32	30	28	25	22	18	13	8	4	0	-2	-5	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35	33	33	30	27	23	19	14	9	5	1	-2	-5	-8	-11	-13	-16	-18	-20	—
	40	43	46	49	50	44	40	38	44	40	38	35	32	28	24	20	15	10	6	2	2	-2	-5	-8	-10	-13	-16	-19	—
	43	47	51	55	58	56	50	45	40	43	40	37	33	29	25	21	16	11	7	3	-1	-4	-7	-10	-13	-16	-19	—	—
	45	50	56	63	70	71	65	57	50	43	38	34	30	26	21	17	12	8	4	0	0	-3	-6	-9	-10	-13	-16	—	—
	47	53	60	73	84	86	77	65	56	47	39	35	31	27	22	18	13	9	5	2	2	-1	-4	-7	-10	-13	-16	—	—
	48	56	64	80	98	103	92	75	60	50	40	36	32	27	22	18	14	10	7	4	3	0	-1	-4	-7	-10	-13	—	—
	—	—	—	—	100	110	104	86	66	52	40	36	32	27	22	18	15	11	8	5	4	0	-1	-4	-7	-10	-13	—	—
	—	—	—	—	96	110	108	92	71	54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 7

Годовые изменения напряженности земного магнитного поля за период 1930—1935 гг. (в 0,00001 CGS)

Полное напряжение ΔT

$\lambda \backslash \varphi$		24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156
70 68 64 60 56 52 48 44 40 36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	23	22	20	17	14	11	8	4	0	-2	-5	-7	-10
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	27	25	23	21	18	15	11	8	4	0	-3	-6	-8	-11
	—	—	31	33	36	39	42	44	38	35	33	31	28	25	22	18	12	8	3	-1	-4	-7	-10	-12
	31	33	36	39	42	44	45	43	40	38	36	33	30	27	22	18	13	8	3	0	-3	-6	-8	-11
	33	36	38	42	48	51	54	51	47	41	38	34	31	27	23	18	14	9	4	2	-1	-4	-7	-10
	35	38	42	48	56	63	66	61	54	47	40	36	32	28	23	18	14	10	6	3	0	-3	-6	-8
	37	41	47	56	67	80	84	75	62	51	43	37	33	28	23	18	14	10	7	4	2	-1	-4	-7
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	56	45	38	33	28	23	18	14	10	7	4	2	-1	-4	-7
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	59	47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

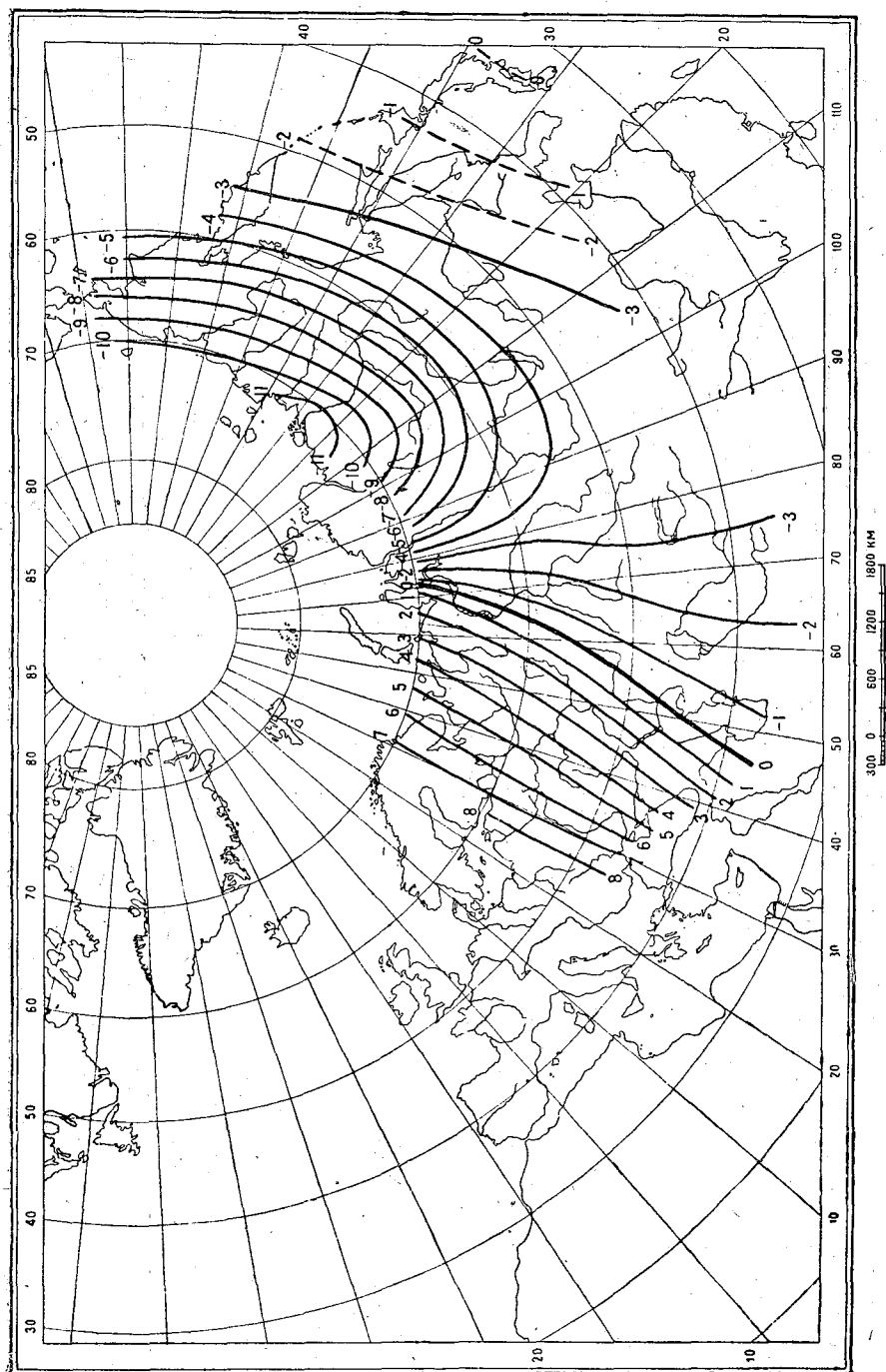


Рис. 2. Карта изопор D . Эпоха 1930—1935 гг.

Годовое изменение ΔD дано в минутах. Знак + соответствует нарастанию восточного склонения, знак — соответствует убыванию.

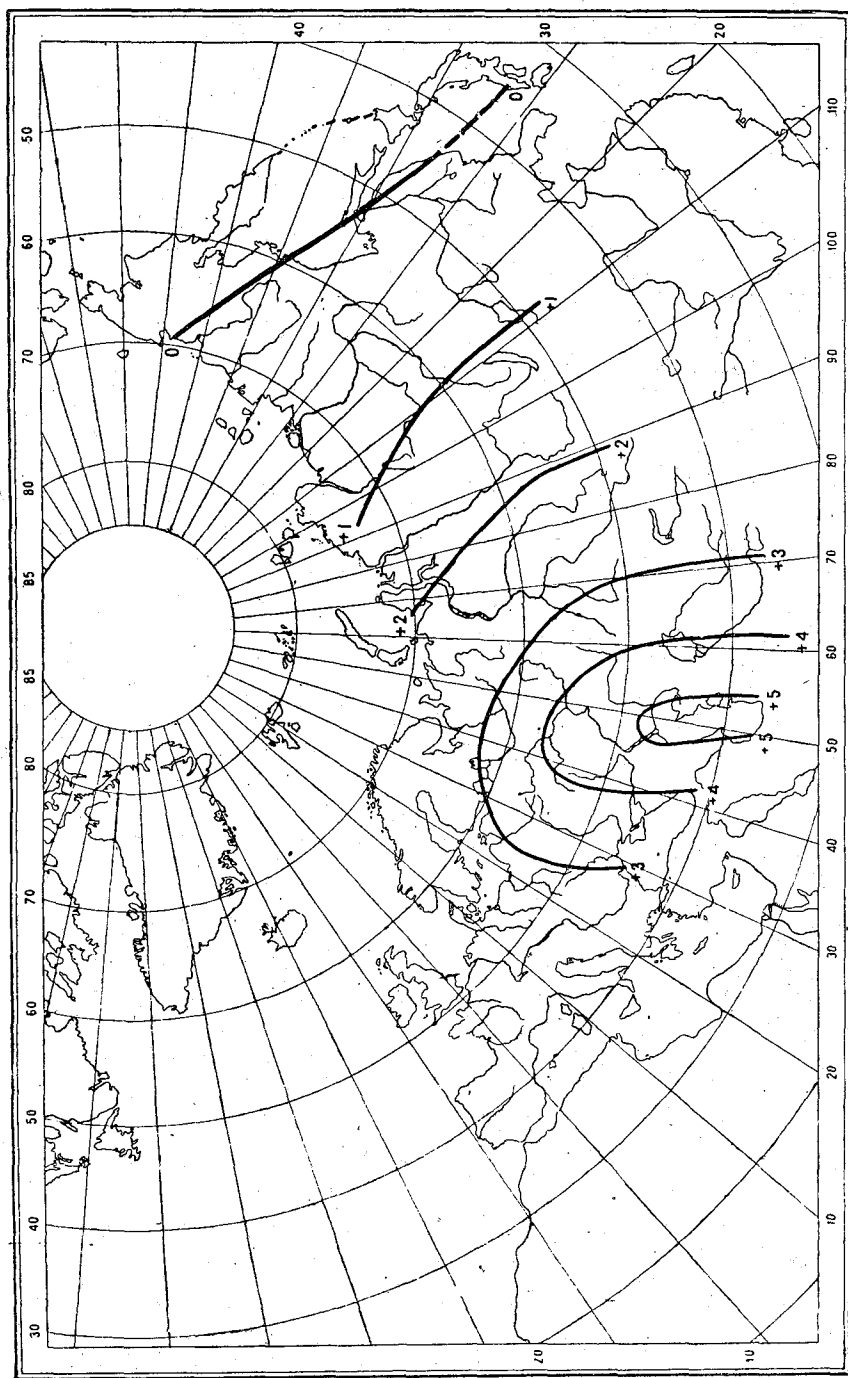


Рис. 3. Карта изопор I для 1930—1935 гг.

Годовое изменение ΔI дано в минутах. Знак + соответствует увеличению наклона, знак — соответствует уменьшению.

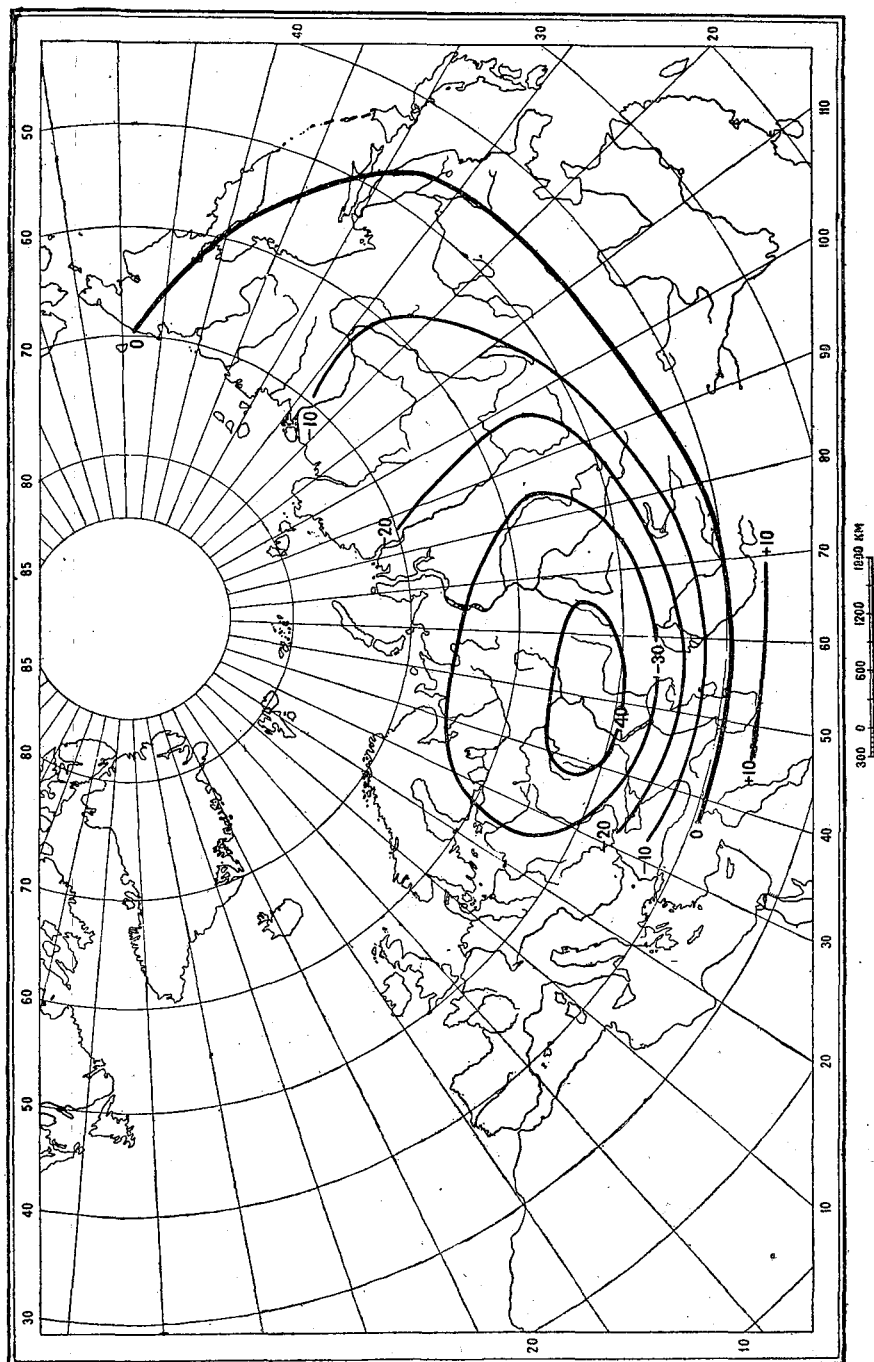


Рис. 4. Карта изопор Н. Эпоха 1930—1935 гг.

Годовое изменение ΔN дано в гаммах. Знак + соответствует нарастанию горизонтальной составляющей, знак — соответствует убыванию.

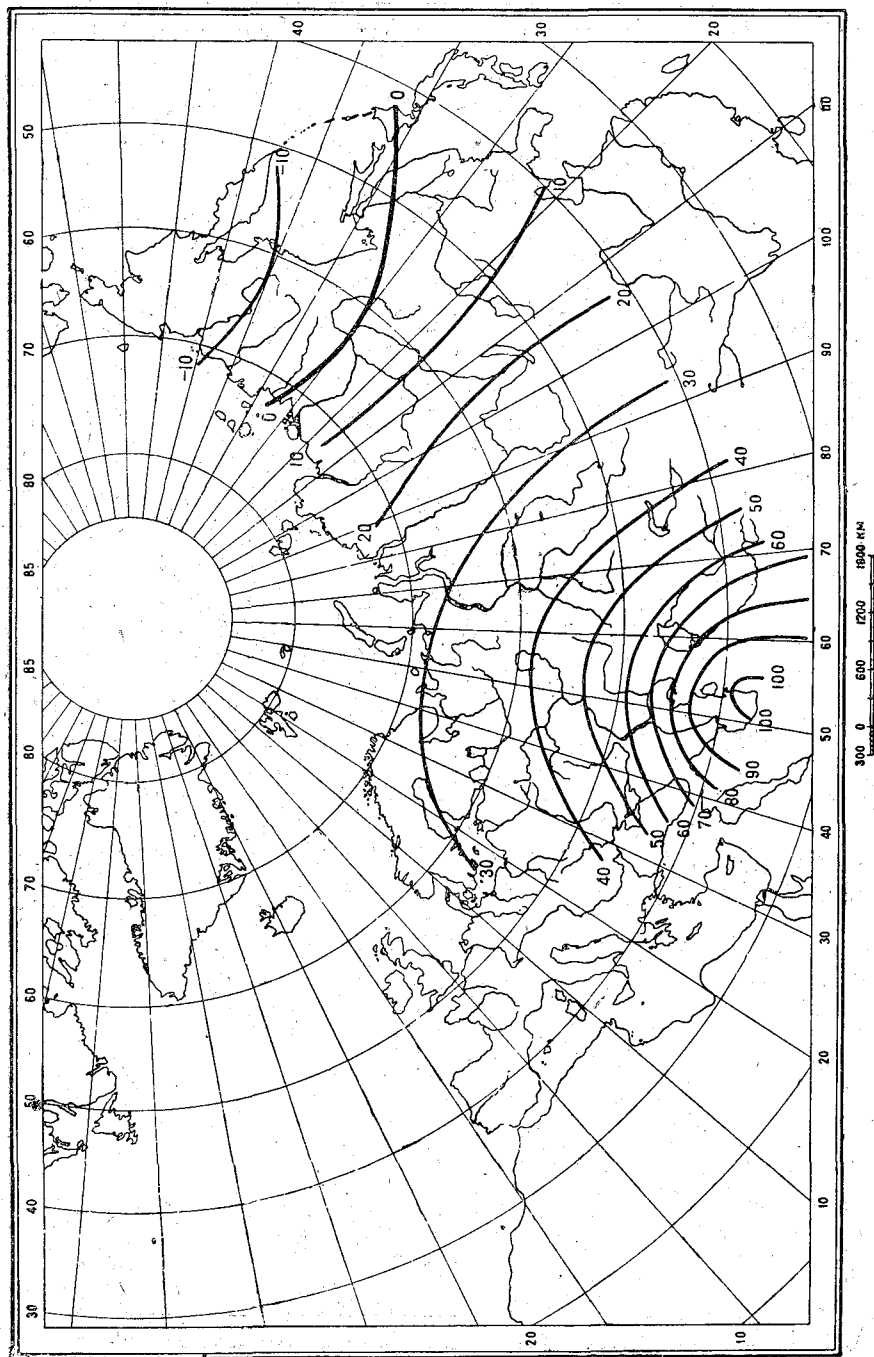


Рис. 5. Карта изопор T . Эпоха 1930—1935 гг.
Годовое изменение T дано в гаммах.

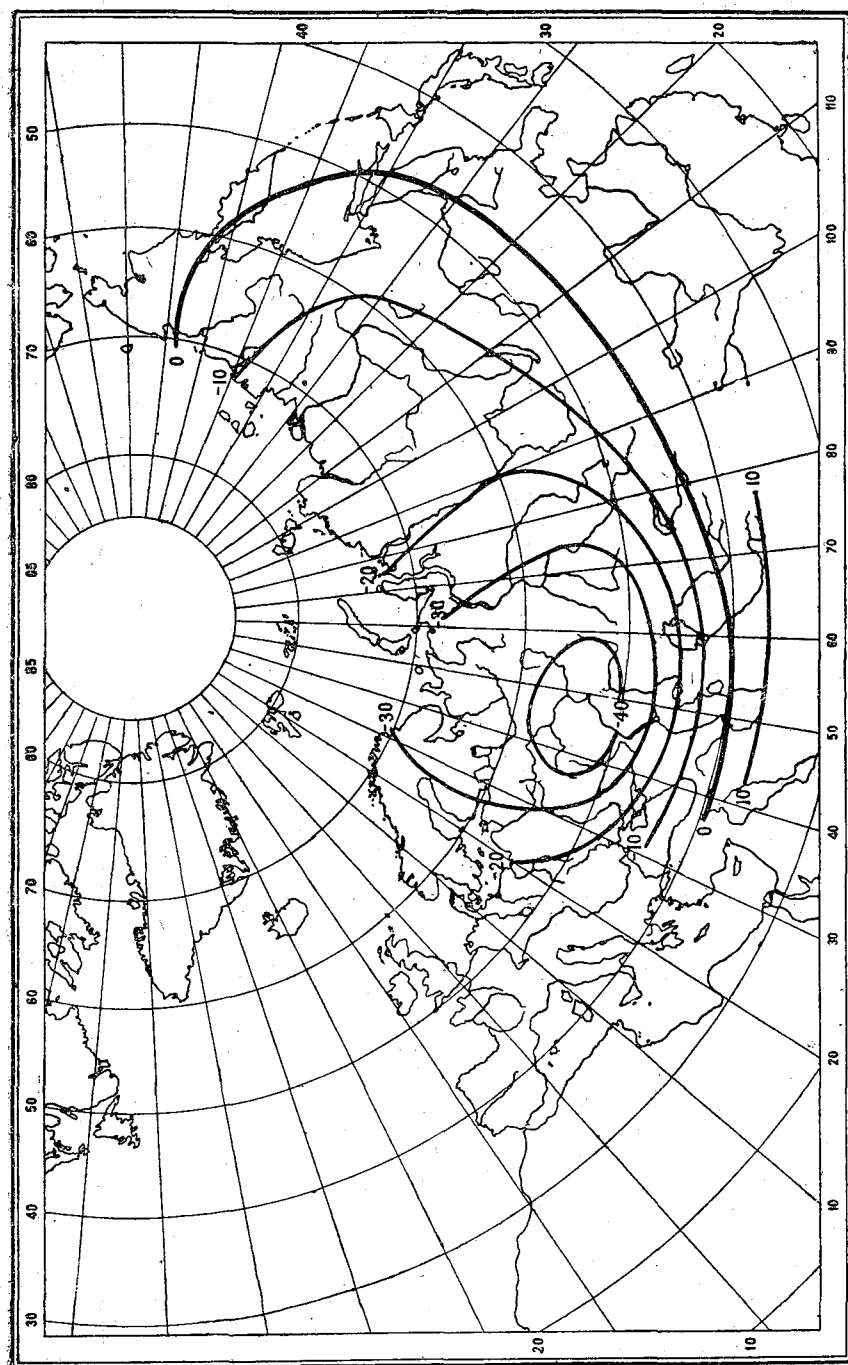


Рис. 6. Карта изопор Х. Элоха 1930—1935 гг.
Годовое изменение дано в гаммах.

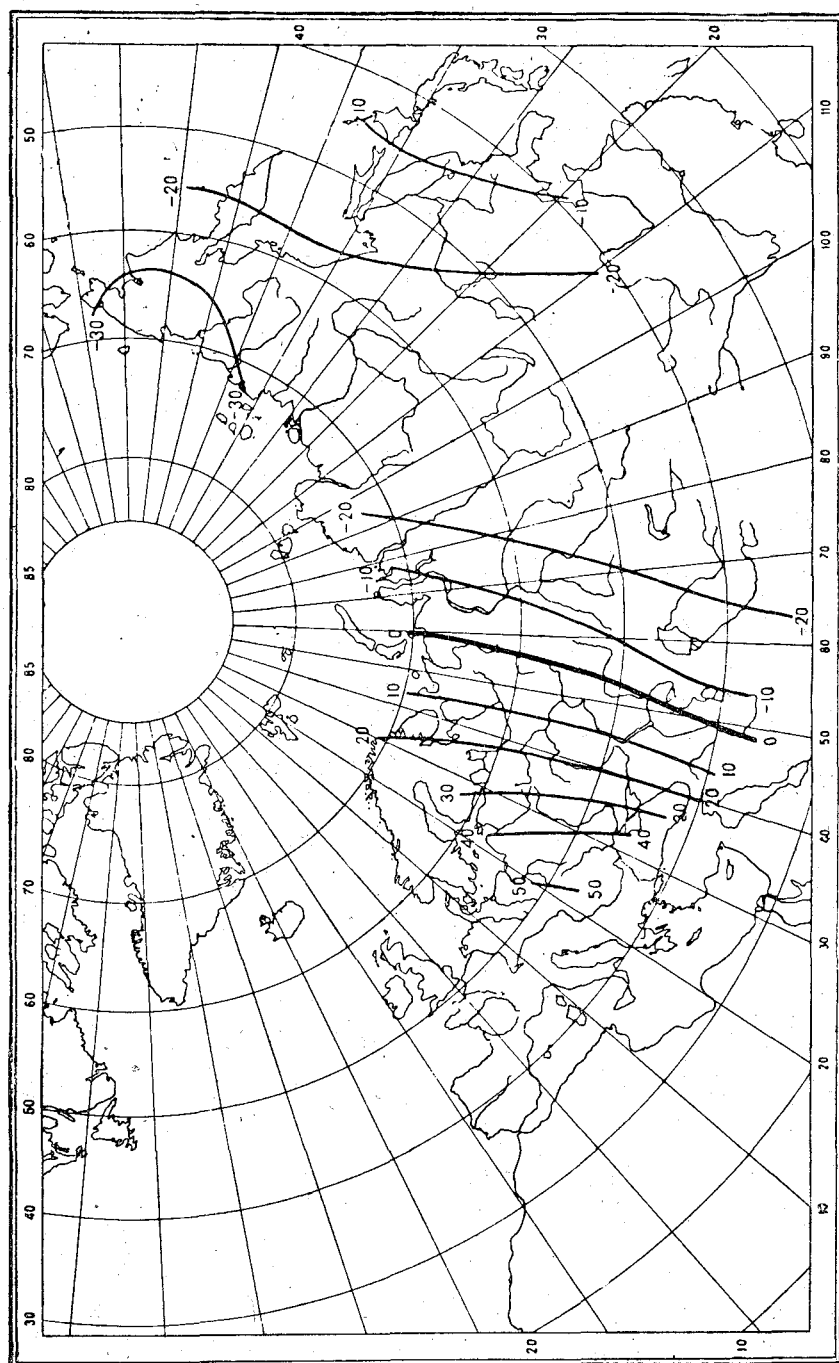


Рис. 7. Карта изопор У. Эпоха 1930—1935 гг.
Годовое изменение дано в гаммах.

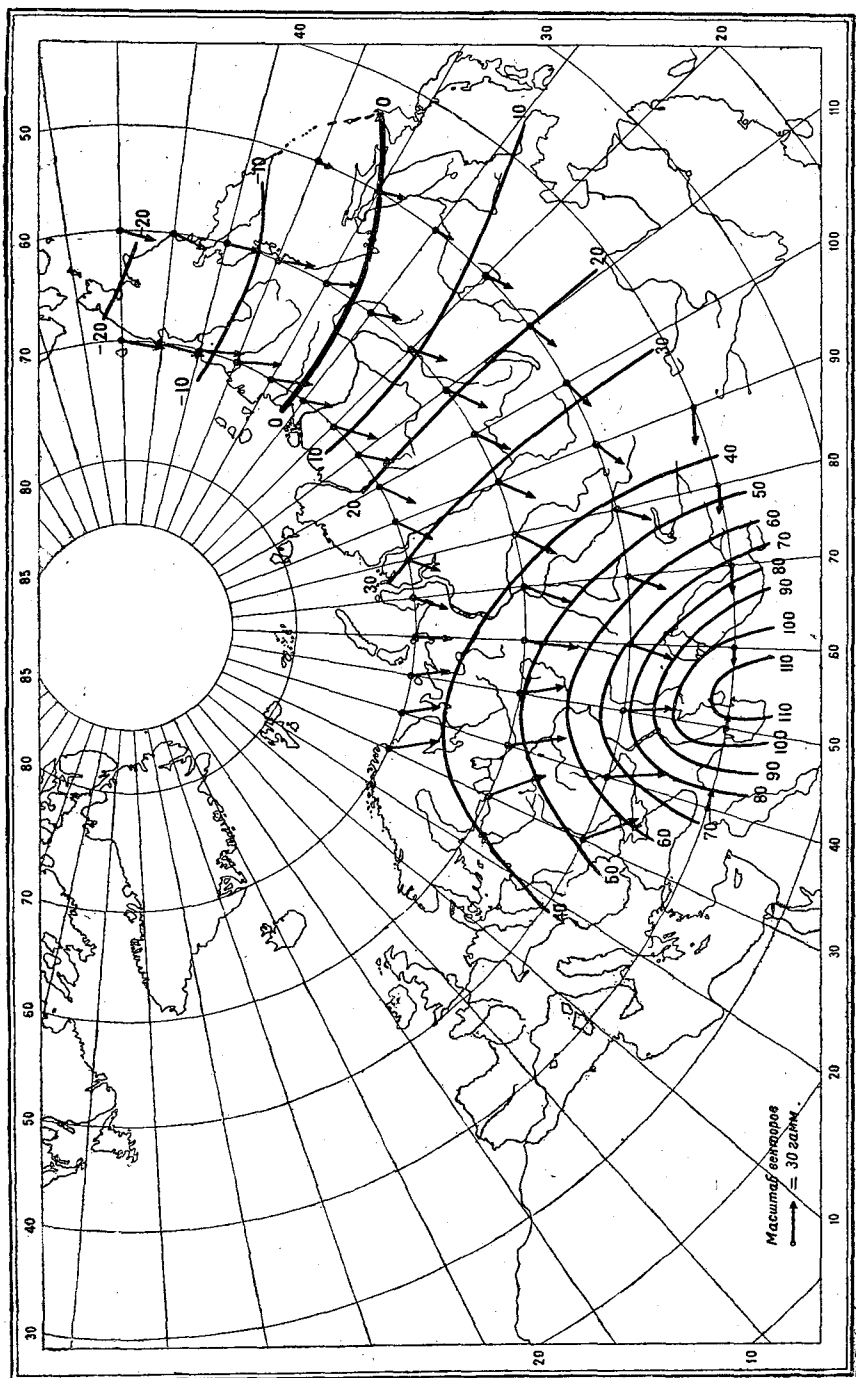


Рис. 8. Карта изопор Z и векторов H_{α} Эпоха 1930—1939 гг.
Годовое изменение дано в гаммах.

INVESTIGATION OF THE SECULAR CHANGE OF THE MAGNETIC ELEMENTS ON THE TERRITORY
OF THE USSR FOR THE PERIOD FROM 1930 TO 1935

By *N. E. Malinina* and *V. P. Orlof*

Summary

For the deduction of the magnitude of annual variations of the magnetic elements have been used the data obtained from observations at 256 repeated stations within the USSR and 15 magnetic observatories both within the USSR and adjacent countries.

It has been determined by the authors that the secular course on the territory of the USSR has changed in comparison to the period from 1925 to 1930. This change was most considerable for the horizontal component. A special diagram shows that this change in the secular course of H has been recorded in 1930 simultaneously by 7 magnetic observatories located in different parts of the USSR.

Maps of isopors have been constructed for the elements: D , I , H , T , X , Y , Z .

The accuracy of the maps of isopors amounts to: $\pm 1'$ for D ; $\pm 0,5$ for I ; $\pm 5 \gamma$ for H , X and Y ; $\pm 20 \gamma$ for Z and T .

On the map of the isopors Z have been constructed the vectors of the annual variations of H , which indicate, in accordance with the isopor Z a „center“ in the region of the Caspian Sea.

The authors are of the opinion that the primary character of the secular course of the elements of the magnetic field depends, nearly on the entire territory of the USSR, on some physical processes that take place at a great depth in the region of the „Caspian center“, and only in the eastern districts of the USSR the secular course depends on the combined effect of the Caspian and Pacific centers, while in the western part of the USSR it depends on the combined effect of the Caspian and Atlantic „centers“.

О ПОЛУЧЕНИИ ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Очень интересная работа Г. Гринберга¹ по тому же вопросу является вполне удачным решением задачи о получении приблизительно однородного магнитного поля внутри соленоида при помощи отдельных витков, расположенных на поверхности соленоида и перпендикулярных к его оси в тех случаях, когда теория указывает, что „вполне однородное поле внутри такого пространства может быть создано с помощью системы токов, непрерывно распределенных по поверхности, это пространство ограничивающей“. (Разрядка наша. — Б. В.)

Решением этой задачи автор оказал большую услугу тем, кому придется строить подобные соленоиды (в частности, шарообразные и эллипсоидальные), выявив те наибольшие отклонения поля от однородности, какие получаются вследствие замены непрерывной системы токов отдельными витками, — отклонения, которые, как можно было сказать априори, оказались весьма незначительными даже при замене равномерной (в смысле числа ампервитков на единицу длины оси) системы токов на шарообразные отдельные витки.

Для целей практики представило бы, однако, не меньший, если не больший интерес нахождение способа получения возможно близкого к однородности поля внутри пространства, ограниченного какой-либо поверхностью вращения, образованной вращением кривой:

$$r = f(x), \quad (1)$$

при помощи n коаксиальных круговых токов

$$i_1, i_2, \dots, i_n, \quad (2)$$

протекающих по виткам радиусов

$$r_1, r_2, \dots, r_n, \quad (3)$$

соответствующих координатам

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad (4)$$

центров токов (2), отсчитываемых от некоторой точки O оси соленоида (рис. 1), причем значения (3) r_i и значения (4) x_i связаны уравнением (1).

Обозначая, по примеру Г. Гринберга, через $\psi(a, b, r_k, x_k)$ магнитный потенциал k -го тока в точке M с координатами (a, b) , имеем для магнитного потенциала всей системы токов выражение:

$$\varphi = \sum_k i_k \psi(a, b, r_k, x_k). \quad (5)$$

Отсюда условия однородности поля на протяжении всего соленоида (если составляющие по осям X -ов и Y -ов обозначить латинскими, а не готическими буквами)

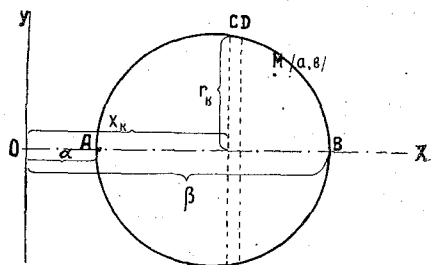


Рис. 1.

¹ Журн. Р. Физ.-хим. общ., часть физ., 58, 483—494, 1926 г.

будут:

$$H_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial a} = -p, \quad (6)$$

$$H_y = 0, \quad (7)$$

где p есть некоторая постоянная. Следовательно должно иметь место уравнение:

$$\varphi = pa + q. \quad (8)$$

Так как при конечном числе витков этому уравнению можно удовлетворить лишь приближенно, то, заменяя систему токов (2) непрерывно распределенным током, линейная плотность которого на протяжении кольца CD (от x_i до $x_i + dx$) равна $Y(x)$, получаем для определения $Y(x)$, как функции от x , интегральное уравнение:

$$\int_a^b Y(x) \psi(a, b, r_k, x_k) dx = pa + q \quad (9)$$

или, вводя шаровые функции $P_i(\cos \theta)$ порядка i от 1 до ∞ ,

$$2\pi \int_a^b Y(x) \left[1 - \frac{x}{x^2 + y^2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i} \frac{(a^2 + b^2)^{\frac{i}{2}}}{R_i} \cdot P_i\left(\frac{b}{a^2 + b^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right) \cdot P_i\left(\frac{x}{R}\right) \right] dx = pa + q. \quad (10)$$

Однако даже нахождение функции $Y(x)$, — а из нее и системы токов (2), которые, как можно сказать с уверенностью на основании работы Г. Гринберга, могут с любой степенью точности заменить непрерывно распределенный по поверхности (1) ток с плотностью $Y(x)$, — мало помогло бы при постройке, на самом деле, соленоидов, внутри которых желательно получить однородное поле, вследствие чрезвычайной трудности изменять число витков на единицу длины сечения (1) поверхности вращения иначе, как в целое число раз, если даже не принимать во внимание трудности наматывать проволоку на поверхностях с сечением (1), имеющим форму кривой.

Рассмотрим, как пример, шар (*mutatis mutandis* — эллипсоид вращения), для которого число витков на единицу длины окружности должно быть обратно пропорционально $\sin \alpha$, если через α (рис. 2) обозначить угол, образуемый радиусом-вектором к витку с осью, на которой лежат центры всех витков. Это приводит к той, совершенно неосуществимой на практике форме обмотки, какая выражается табл. 1 и изображена схематически на рис. 2.

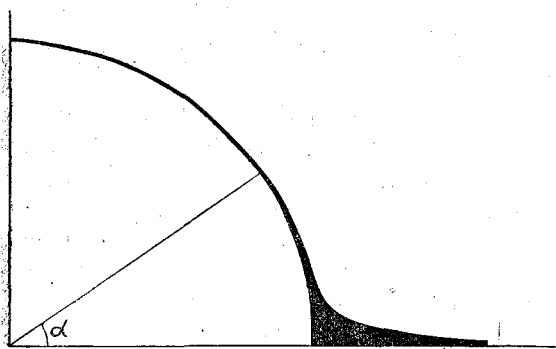


Рис. 2.

Таблица 1

α	$Y(\alpha)$	α	$Y(\alpha)$
90°	1,00	10°	5,8
60	1,16	5	11,5
45	1,41	3	19,1
30	2,00	2	28,6
20	2,93	1	57,4
15	3,86		

Поэтому представляло бы интерес выяснить, насколько будет отличаться от однородности поле, создаваемое различными совокупностями легко осуществимых цилиндрических соленоидов с равномерной обмоткой, закрытых с концов

плоскими или коническими — также легко осуществимыми — насадками, имеющими тоже равномерную обмотку.

Чтобы иметь дело с условиями, наиболее близкими к требованиям и возможностям практики, я принял за основу эллипсоид вращения с отношением осей 2 к 1, но ввиду того, что даже при отношении длины соленоида к его наибольшему диаметру, равном 2,5:1, весь соленоид будет не слишком длинным, вычислил распределение поля для трех случаев, изображенных на рис. 3—5 и характеризуемых табл. 2, в которой даны для правой половины соленоида координаты (от его центра) точек перехода одного в другой отдельных прямолинейных кусков сечения соленоида.

Случай *I* соответствует цилиндру длиной в 5,000, закрытому с каждого конца плоскостью; случай *II* — цилиндру длиной в 1,000, имеющему на каждом конце по полуэллипсоиду с осями 2 и 1, замененному затем касательным к нему цилиндром (в средней части, так что общая длина среднего цилиндра на рис. 4 равна 3,552), конусом с раструбом в 90° и плоскостью; случай *III* — цилиндру длиной в 1,000 с аналогичными полуэллипсоидами на концах, замененными каждый цилиндром (так что общая длина средней цилиндрической части на рис. 5 равна 2,636), усеченным конусом с раструбом в 60° и конусом с раструбом в 120°.

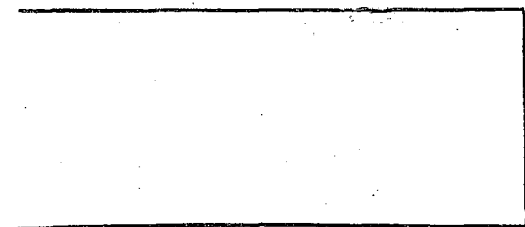


Рис. 3.

в точке *a*, *b* обмоткой из *n* витков на единицу длины по оси *x*-ов, расположенных на поверхности усеченного конуса (рис. 6), сечение которого на этом рисунке

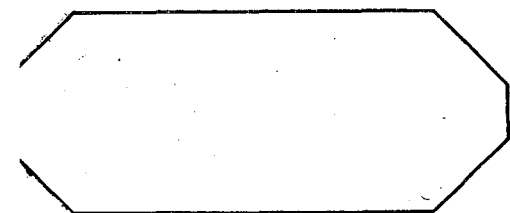


Рис. 4.

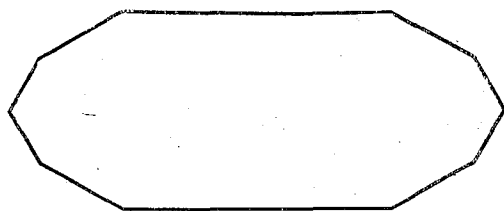


Рис. 5.

обозначено чрез $Y_1 Y_2 Y_2' Y_1'$ получаются (из формул¹ для составляющих от одиночного кругового тока) следующие интегралы:

$$H_x = 2\pi ni \int_{x_1}^{x_2} \frac{m^2 x^2}{\rho^3} \left\{ 1 + \frac{3b^2}{4\rho^4} [m^2 x^2 - 4(a-x)^2] + \right. \\ \left. + \frac{45b^4}{64\rho^8} [m^4 x^4 - 12m^2 x^2 (a-x)^2 + 8(a-x)^4] + \dots \right\} dx; \quad (11)$$

¹ См. например Н. В. Розе, Н. Н. Трубятчинский, Б. М. Яновский. Земной магнетизм и магнитная разведка, ГППИ, 1934, — формулы (12, 13) и (12, 14) на стр. 40, из которых в первой следует исправить очевидные опечатки: $(\rho_0^2 - 4x)^2$ и $8x^2$ вместо $(\rho_0^2 - 4x^2)$ и $8x^4$, и во второй: $= 5\rho_0^2$ и $8x^2$ вместо $+ 5\rho_0^4$ и $8x^4$.

$$H_y = -3\pi ni \int_{x_1}^{x_2} \frac{m^2 ab x^2}{\rho^5} \left\{ 1 + \frac{5b^2}{8\rho^4} [3m^2 x^2 - 4(a-x)^2] + \right. \\ \left. + \frac{35b^4}{64\rho^8} [5m^4 x^4 - 20m^2 x^2 (a-x)^2 + 8(a-x)^4] + \dots \right\} dx, \quad (12)$$

где

$$\rho = \sqrt{m^2 x^2 + (a-x)^2}. \quad (13)$$

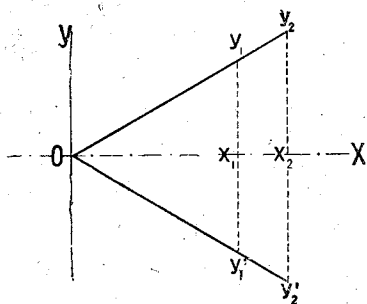


Рис. 6.

Все эти интегралы можно взять в конечном виде, но, ввиду довольно быстрого убывания членов рядов, заключенных в фигурные скобки, я при этих интегрированиях отбросил в них члены с ρ^{-8} и дальнейшие, а для членов с ρ^{-4} не произвел интегрирований в конечном виде, ограничившись в дальнейшем вычислениями числовых значений соответствующих им интегралов. Таким образом для вычисления поля от конических обмоток в случаях II и III я пользовался формулами:

$$H_x = \frac{2\pi nim^2}{(1+m^2)^2} \left\{ \lg \frac{(1+m^2)x_2 - a + \sqrt{(1+m^2)[(1+m^2)x_2^2 - 2ax_2 + a^2]}}{(1+m^2)x_1 - a + \sqrt{(1+m^2)[(1+m^2)x_1^2 - 2ax_1 + a^2]}} + \right. \\ \left. + \frac{1+m^2}{m^2} \left[\frac{(1-m^2)x_2 - a}{\sqrt{(1+m^2)[(1+m^2)x_2^2 - 2ax_2 + a^2]}} - \frac{(1-m^2)x_1 - a}{\sqrt{(1+m^2)[(1+m^2)x_1^2 - 2ax_1 + a^2]}} \right] \right\} + \\ + \frac{3\pi nim^2 b^2}{V 1+m^2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{x^2 [m^2 x^2 - 4(a-x)^2]}{[(1+m^2)x^2 - 2ax + a^2]^{7/2}} dx, \quad (14)$$

$$H_y = -\frac{\pi niab}{1+m^2} \left\{ \frac{2+m^2}{a^2 m^2} \left[\frac{(1+m^2)x_2 - a}{[(1+m^2)x_2^2 - 2ax_2 + a^2]^{1/2}} - \frac{(1+m^2)x_1 - a}{[(1+m^2)x_1^2 - 2ax_1 + a^2]^{1/2}} \right] + \right. \\ \left. + \frac{(1-m^2)x_2 - a}{[(1+m^2)x_2^2 - 2ax_2 + a^2]^{3/2}} - \frac{(1-m^2)x_1 - a}{[(1+m^2)x_1^2 - 2ax_1 + a^2]^{3/2}} \right\} - \\ - \frac{15}{8} \pi nim^2 ab^3 \int_{x_1}^{x_2} \frac{x^2 [3m^2 x^2 - 4(a-x)^2]}{[(1+m^2)x^2 - 2ax + a^2]^{9/2}} dx. \quad (15)$$

Для плоских же обмоток (случаи I и II) таким же путем были получены следующие формулы:

$$H_x = 2\pi ni \int_0^{y_2} \frac{y^2}{\rho^3} \left[1 + \frac{3b^2}{4\rho^4} (y^2 - 4\xi^2) + \frac{45b^4}{64\rho^8} (y^4 - 12\xi^2 y^2 + 8\xi^4) + \dots \right] dy, \quad (16)$$

$$H_y = -3\pi ni \int_0^{y_2} \frac{aby^2}{\rho^5} \left[1 + \frac{5b^2}{8\rho^4} (3y^2 - 4\xi^2) + \frac{35b^4}{64\rho^8} (5y^4 - 20y^2 \xi^2 + 8\xi^4) + \dots \right] dy, \quad (17)$$

где n — число витков на единицу радиуса плоской катушки, а

$$\xi = a - x = \text{const}; \quad (18)$$

$$\rho = \sqrt{y^2 + \xi^2}. \quad (19)$$

Для вычислений из формул (16) и (17) были — аналогично (14) и (15) — получены следующие интегралы:

$$H_x = 2\pi ni \left(\lg \frac{y_2 + \sqrt{y_2^2 + \xi^2}}{\xi} - \frac{y_2}{\sqrt{y_2^2 + \xi^2}} + \frac{3b^2}{4} \int_0^{y_2} \frac{y^2(y^2 - 4\xi^2)}{(y^2 + \xi^2)^{7/2}} dy \right); \quad (20)$$

$$H_y = -\pi niab \left\{ y_2 \left[\frac{1}{\xi^2 (y_2^2 + \xi^2)^{1/2}} - \frac{1}{(y_2^2 + \xi^2)^{3/2}} \right] + \frac{15b^2}{8} \int_0^{y_2} \frac{y^2(3y^2 - 4\xi^2)}{(y^2 + \xi^2)^{9/2}} dy \right\}. \quad (21)$$

Действие цилиндрических частей радиуса ρ_0 и длины $2l$ вычислялось для точки с координатами a, b , отсчитанными от центра среднего витка, по обычным формулам:

$$H_x = -2\pi ni \left\{ \frac{a+l}{\rho_1} - \frac{a-l}{\rho_2} + 3b^2 \rho_0^2 \left[\frac{a+l}{\rho_1^5} - \frac{a-l}{\rho_2^5} \right] + \dots \right\}; \quad (22)$$

$$H_y = -3\pi ni \rho_0^2 b \left\{ \frac{1}{\rho_1^3} - \frac{1}{\rho_2^3} - \frac{b^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_1^5} - \frac{1}{\rho_2^5} \right) + \frac{3b^2 \rho_0^2}{8} \left(\frac{1}{\rho_1^7} - \frac{1}{\rho_2^7} \right) + \dots \right\}, \quad (23)$$

где

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_0^2 + (a+l)^2}; \quad (24)$$

$$\rho_2 = \sqrt{\rho_0^2 + (a-l)^2}. \quad (25)$$

Замечу, что для точек, лежащих на оси цилиндров и конусов, т. е. имеющих $b=0$, H_y становится равным 0, а в выражениях (16), (22) и (24) остаются только по два первых члена.

Вычисления велись для точек (рис. 7), которые лежат внутри соленоида — в центре среднего витка соленоида и на расстоянии в 0,9 радиуса цилиндрической его части от него и координаты которых следующие:

Таблица 3

Точки	a	b
O	0,00	0,00
A	0,00	0,90
B	0,45	0,78
C	0,78	0,45
D	0,90	0,00

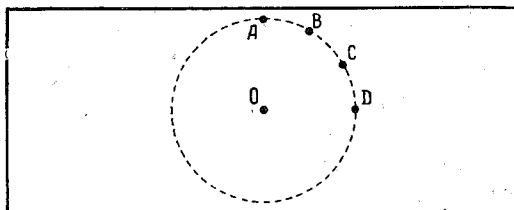


Рис. 7.

Результаты вычислений выражаются табл. 4 (стр. 118), в которой n_1 и n_2 представляют для следующих за цилиндрической частью соленоида обмоток отношения числа витков на единицу длины образующей конуса или радиуса плоской катушки к числу витков на единицу длины образующей цилиндрической части, а значения H_x и H_y выражены в долях поля H_x для бесконечно длинного цилиндрического соленоида.

Значения n_1 и n_2 для удобства практического осуществления должны быть целыми числами или дробями с небольшими знаменателями, и, варьируя их, можно сделать различия в значениях составляющей H_x и величины составляющей H_y в различных точках центральной части соленоида — на протяжении 0,9 радиуса от его

Таблица 4

Соленоид	<i>O</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
I	$H_x = 0,9284 +$ $+0,0186 n_1$ $H_y = 0,0000 +$ $+0,0000 n_1$	$0,9381 -$ $-0,0039 n_1$ $0,0000 +$ $+0,0000 n_1$	$0,9321 +$ $+0,0111 n_1$ $0,0279 +$ $+0,0084 n_1$	$0,9154 +$ $+0,0218 n_1$ $-0,0338 +$ $+0,0080 n_1$	$0,9037 +$ $+0,0296 n_1$ $0,0000 +$ $+0,0000 n_1$
II	$H_x = 0,8702 +$ $+0,0234 n_1 +$ $+0,0024 n_2$ $H_y = 0,0000 +$ $+0,0000 n_1 +$ $+0,0000 n_2$	$0,9024 +$ $+0,0115 n_1 +$ $+0,0022 n_2$ $0,0000 +$ $+0,0000 n_1 +$ $+0,0000 n_2$	$0,8640 +$ $+0,0160 n_1 +$ $+0,0018 n_2$ $-0,0827 +$ $+0,0212 n_1 +$ $+0,0010 n_2$	$0,8308 +$ $+0,0294 n_1 +$ $+0,0006 n_2$ $-0,1053 +$ $+0,0262 n_1 +$ $+0,0008 n_2$	$0,7957 +$ $+0,0491 n_1 +$ $+0,0007 n_2$ $0,0000 +$ $+0,0000 n_1 +$ $+0,0000 n_2$
III	$H_x = 0,7967 +$ $+0,0718 n_1 +$ $+0,00065 n_2$ $H_y = 0,0000 +$ $+0,0000 n_1 +$ $+0,0000 n_2$	$0,8684 +$ $+0,0450 n_1 -$ $-0,0002 n_2$ $0,0000 +$ $+0,0000 n_1 +$ $+0,0000 n_2$	$0,8402 +$ $+0,0669 n_1 -$ $-0,0006 n_2$ $-0,1711 +$ $+0,0910 n_1 +$ $+0,0120 n_2$	$0,7416 +$ $+0,1147 n_1$ $-0,0015 n_2$ $-0,2035 +$ $+0,1098 n_1 +$ $+0,0262 n_2$	$0,6486 +$ $+0,1671 n_1 -$ $-0,0030 n_2$ $0,0000 +$ $+0,0000 n_1 +$ $+0,0000 n_2$

центра — весьма незначительными. Так, если в I соленоиде сделать $n_1 = 1$, во II соленоиде $n_1 = 3$ и $n_2 = 1$, а в III соленоиде $n_1 = 1^{3/4}$ и $n_2 = 1/2$, то получаются следующие отклонения значений H_x от средних для точки *A*, *B*, *C* и *D* и значение H_y , выраженные в процентах от этих средних.

Таблица 5

Соленоид		<i>O</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
I	H_x	+1,0	-0,2	+0,6	0,0	-0,5
	H_y	0	0	-2,1	-2,7	0
II	H_x	+0,9	+0,4	-0,0	-1,5	+1,1
	H_y	0	0	-1,9	-2,7	0
III	H_x	-2,5	+0,1	+1,1	-0,5	-0,5
	H_y	0	0	-0,6	+0,3	0

Последний раздел табл. 5 показывает, что, накладывая на цилиндрическую часть соленоида, изображенного на рис. 5, четыре слоя, на концах с раструбом в 60° — семь слоев и на концах с раструбом в 120° — два слоя (при одинаковой плотности намотки во всех случаях), можно получить на поверхности интересующего нас центрального сферического пространства постоянство поля в пределах около про-

цента, т. е. раза в 3 более узких, чем получилось бы от цилиндрического соленоида примерно той же длины.

ON OBTAINING A UNIFORM MAGNETIC FIELD

By B. P. Weinberg

Summary

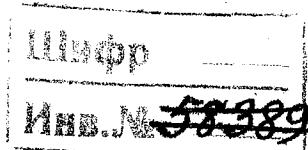
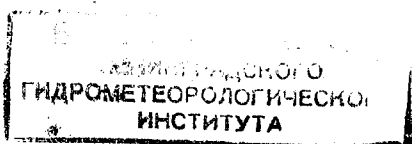
G. Grünberg (footnote on p. 115) has shown that a system of circular currents of a variable linear density $\varphi(x)$ circulating around a solenoid the surface of which is generated by rotation of a curve (1) around its axis can — without sensibly disturbing the uniformity of the field — be replaced by a system of n coaxial circular currents of strengths (2), flowing in separate windings of radii (3) situated at distances (4)

from the origin of coordinates (fig. 1). This circumstance allows to consider $\varphi(x)$ as the number of windings per unit of length of the solenoid and to obtain a practically uniform magnetic field by suitably varying this number.

The difficulties of realization of winding a coil in continually varying the number of windings per unit of length (f. i. in an inversely proportion to $\sin \alpha$ in the case of a sphere—table 1 and fig. 2) compelled the author to investigate what order of smallness of the deflections from the uniformity of the field may be attained by different combinations of cylinders, cones, truncated cones and planes perpendicular to the axis each of which should be wound uniformly.

The author has calculated the field for three solenoids—fig. 3—5 and table 2—corresponding to different polygons circumscribed around an ellipsis with the relation of the axes 2 to 1. For the fields generated by conical windings the author deduced the formulae (14) and (15)—fig. 6—and for the fields from flat windings—the formulae (16) and (17). The computations were executed for the points O, A, B, C, D —table 3 and fig. 7—and led to the results given in the table 4 where H_x and H_y are given as function of, the H_x for an infinitely long cylindrical coil and n_1 and n_2 are the numbers of windings of the parts of the coil next the central cylindrical part, the number of windings per unit of length of which being taken as unit.

The table 5 gives the values of H_x and H_y for $n_1 = 1$ in the case I, for $n_1 = 3$ and $n_2 = 1$ in the case II and for $n_1 = 1\frac{3}{4}$ and $n_2 = \frac{1}{2}$ in the case III, thus showing the possibility of obtaining (in the last case) by simple means a field with deflections from uniformity in the central part of the order of a percent what is about 3 times less than in a cylindrical coil of the same length.



СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
К. Б. Вейнберг. Применение способа Фарадея для изображения магнитного поля силовыми линиями к интерпретации результатов магнитных съемок	3
А. Попов. Магнитное поле прямого сброса	14
А. В. Светлов, В. Г. Строганов. Решение плоской задачи Robin'a—Poincaré для некоторых многосвязных областей	26
О. Ю. Солодухо. Геологическое картирование магнитной съемкой Причарской полосы основных пород	37
В. И. Рейнеке и Н. Н. Трубяччинский. Геомагнитное поле Ленинградской области в связи с вопросами ее геологической структуры	56
П. Е. Федулов. Магнитные пульсации	66
Б. М. Яновский. О вариациях элементов земного магнетизма в аномальном поле	77
Н. Е. Малинина и В. П. Орлов. Исследование векового хода магнитных элементов на территории СССР для эпохи 1930—1935 гг.	92
Б. П. Вейнберг. О получении однородного магнитного поля	109

CONTENTS

	Pag.
K. B. Weinberg. The application of the Faraday's method of representation of the magnetic field by the lines of force to the interpretation of the magnetic surveys	12
A. Popoff. The magnetic field of a straight fault	25
A. V. Svetlov, V. G. Stroganof. The solution of the plane Robin—Poincaré problem for some multiconnected regions	36
O. J. Solodukho. Geological mapping by means of magnetic survey in the zone of principal rocks near the Tchar River	55
V. I. Reineke, N. N. Trubiatchinsky. The magnetic field of the Leningrad district	65
P. E. Fedulof. Magnetic pulsations	76
B. M. Yanovsky. Variations in an anomalous field	90
N. E. Malinina, V. P. Orlof. Investigation of the secular change of the magnetic elements on the territory of the USSR for the period from 1930 to 1935	108
B. P. Weinberg. On obtaining a uniform magnetic field	114

Отв. редактор Б. П. Вейнберг.

Техреды Е. Б. Бердникова и Т. Л. Лейкина

Корректор Г. М. Митрофанов.

Леноблгортлит № 5559. Издание № 90. Сдано в набор 10/IX 1937 г. Подписано к печ. 24/I 1938 г.
 Кол. учетно-авт. лист. 141¹/₈ л. Печ. л. 71¹/₄. Бум. л. 35⁵/₈. Кол. знак. на бум. л. 156000.
 Стат. формат бумаги 70×105¹/₁₆. Заказ № 1974. Тираж 800 экз.

2-я типо-литография Гидрометеониздата, Ленинград, набережная 9 Января, 32.